

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Návrh metody úpravy zeminy pro násyp dopravní komunikace

Design of a Method of Soil Treatment in the Road Embankment

Student

Klára Faltínová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Klára Faltínová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Návrh metody úpravy zeminy pro násyp dopravní komunikace**
Design of a Method of Soil Treatment in the Road Embankment
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Úvod

Metody úpravy zemín užívané ve výstavbě násypů dopravních komunikací

Kritéria hodnocení zemín pro konstrukci násypů dopravních komunikací

Příklad návrhu upravené zeminy

Stanovení parametrů neupravené a upravené zeminy

Návrh násypů z neupravené a upravené zeminy a jejich srovnání

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Šimek, J., Jesenák, J., Eichler, J., Vaníček, I. *Mechanika zemin*. Praha : SNTL, 1990

Vaníček, I., Vaníček, M. *Earth Structures in Transport, Water and Environmental Engineering*. Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-3963-8

Kresta, F. *Úprava zemin*. Česká silniční společnost z.s., 2020. ISBN 978-80-02-02904-5

Bell, F.G. *Engineering Treatment of Soils*. University of Natal Durban : E&FN SPON, 1993. ISBN 0-203-78242-9

Moseley, M.P., Kirsch, K. *Ground Improvement 2nd Ed*. London and New York : Spon Press Taylor & Francis Group, 1993. ISBN 0-415-27445-9

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 30.10.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.“

V Ostravě, dne

Klára Faltínová

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užití svého díla – bakalářskou práci nebo poskytnutí licence k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

Anotace

FALTÍNOVÁ, Klára. *Návrh metody úpravy zeminy pro násyp dopravní komunikace*. Ostrava, 2021. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební.

Tato bakalářská práce je zaměřena na sledování sedání násypového tělesa pro pozemní komunikaci, tvořeného vybranou zeminou. Výsledky jsou zpracovány v aplikaci GEO5 metodou konečných prvků. Na vzorku přirozené zeminy je provedena zkouška zhutnitelnosti Proctor standard a zkouška v krabicovém smykovém přístroji. Významnou částí práce tvoří stanovení edometrického modulu neupravené zeminy a zeminy upravené cementem v různých poměrech. Neupravená zemina a zemina upravená cementem, která dosáhla nejvyšší hodnoty edometrického modulu je následně použita ve výpočtovém modelu. Výsledky jsou srovnány z pohledu chování zemní konstrukce v čase a je navrženo řešení problematiky v praxi.

Klíčová slova: násyp, sedání, úprava zemin, modul pružnosti, deformační modul, metoda konečných prvků

Annotation

FALTÍNOVÁ, Klára. *Design of a Method of Soil Treatment in the Road Embankment*. Ostrava, 2021. Bachelor thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering.

This bachelor thesis is focused on monitoring road embankment treatment. The finite element method software GEO5 is utilized for settlement calculation. The Proctor standard test and Direct shear box test were performed with a soil sample. The main part of this thesis deals with elastic modulus estimation of untreated and cement treated soil. Both untreated and treated samples are used for settlement calculation. The final results are compared and presented together with practical recommendations.

Key words: embankment, settlement, soil stabilization, modulus of elasticity, modulus of deformation, finite element method

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Vojtasíkovi, CSc. za odborné rady a vedení při tvorbě mé bakalářské práce. Dále bych také chtěla poděkovat své rodině a nejbližším za ohleduplnost a neustálou podporu během celého studia.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Metody úpravy zemin užívané ve výstavbě násypů dopravních komunikací.....	12
2.1. Návrh násypu dopravních komunikací	14
2.2. Úpravy zemin užívané pro stavbu násypů dopravních staveb.....	14
2.3. Úprava zemin v aktivní zóně	15
2.3.1. Mechanická stabilizace	16
2.3.1.1. Vlákná při úpravě zemin	17
2.3.2. Úprava zemin pojivy	17
2.3.2.1. Vápno	18
2.3.2.2. Cement	18
2.3.2.3. Popílek.....	19
2.3.2.4. Vysokopecní struska	19
2.4. Zařízení a stoje pro úpravu zemin	19
3. Kritéria hodnocení zemin pro konstrukci násypů dopravních komunikací	20
3.1. Geotechnické kategorie	20
3.2. Mezní stavy.....	21
3.2.1. Mezní stav porušení	21
3.2.2. Mezní stav použitelnosti	22
3.2.2.1. Limitní hodnota deformace	22
3.3. Průkazní zkoušky zemin.....	24
3.3.1. Proctor standard	25
3.3.1.1. Postup zkoušky.....	26
3.3.2. Edometrická zkouška	27
3.3.3. Krabicová zkouška.....	29
3.4. Kontrolní zkoušky na zemní pláni pro upravované zeminy	31

4. Příklad návrhu upravované zeminy	33
5. Stanovení parametrů upravované a neupravované zeminy	37
5.1. Proctor standard	37
5.2. Vyhodnocení krabicové zkoušky	38
5.3. Edometrická zkouška	39
5.4. Vyhodnocení zkoušky pro neupravenou zeminu	41
5.5. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 1,5 %	42
5.6. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 3 %	43
5.7. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 6 %	44
6. Návrh násypu z upravené a neupravené zeminy a jejich srovnání	46
6.1. Fáze vytvořené v modelu	48
6.2. Aplikace neupravené zeminy	48
6.3. Aplikace upravené zeminy s příměsí cementu v poměru 6 %	50
7. Závěr	53
Seznam obrázků	55
Seznam tabulek	56
Seznam grafů	57
Seznam literatury	58
Seznam příloh	60
Přílohy	61

Seznam zkratk a proměnných

symbol	název
E_{def}	Modul přetvárnosti, deformační modul [kPa]
E_{oed}	Edometrický modul, modul pružnosti [kPa]
w_{opt}	Optimální vlhkost [%]
I_P	Index plasticity
CBR	Kalifornský poměr únosnosti [%]
CBR_{opt}	Kalifornský poměr únosnosti zeminy s optimální vlhkostí [%]
CBR_{sat}	Kalifornský poměr únosnosti zeminy satureované [%]
I_c	Stupeň konzistence
w_L	Mez tekutosti
ρ_{dmax}	Maximální objemová hmotnost [kN/m ³]
E_d	Návrhová hodnota účinků zatížení
R_d	Návrhová hodnota odporu k zemině
C_d	Limitní návrhová hodnota účinků zatížení
U_T	Stupeň konsolidace
S_c	Celkové sedání [m]
T	Časový faktor
c_v	Součinitel konsolidace
d	Mocnost konsolidované vrstvy [m]
t	Čas
k	Koeficient filtrace [m/s]
γ_n	Objemová tíha zeminy [kN/m ³]
ε_x	Vodorovná deformace [-]
σ_{xef}	Vodorovné napětí ve směru x [kPa]
σ_{yef}	Vodorovné napětí ve směru y [kPa]
σ_{zef}	Svislé napětí [kPa]
K_r	Součinitel K_r určující vztah mezi vodorovným a svislým napětím
ν	Poissonovo číslo
β	Koeficient beta
τ	Tangenciální napětí [kPa]
σ	Normálové napětí [kPa]
φ	Úhel vnitřního tření [°]
c	Soudržnost

γ_{sat}

Objemová tíha saturované zeminy [kN/m³]

PIII

Typ podloží vozovky

1. Úvod

Nejen v České republice se setkáváme s problematikou zemního prostředí, která přímo ovlivňuje vlastnost a životnost staveb. Skutečnost je ovšem taková, že při návrhu veškerých geotechnických staveb i konstrukcí se pohybujeme v kompozitním prostředí proměnlivých mechanických, fyzikálních a popisných vlastností, které často nevyhovují potřebám a požadavkům pro daný objekt a jeho funkci. Proto situace, kdy nevyhovující vlastnosti stávajícího materiálu potřebujeme upravit tak, aby mohl poskytovat potřebnou kvalitu není výjimečná.

Nevhodnost materiálu je relativní a v mnoha případech je možno daný parametr zlepšit tak, aby stávající materiál mohl sloužit dané funkci a nemusel přijít na zmar. Situování infrastruktury do méně podmínkově vhodných poměrů může ušetřit příznivější oblasti pro jiná využití.

Tato práce je zaměřena na úpravu zemin v násypu při rekonstrukci silnice II. třídy nedaleko Uherského Hradiště. Zemina použitá pro návrh způsobu úpravy a následné aplikována ve výpočtovém modelu do násypu dopravní komunikace je hodnocena na základě E_{def} - modulu přetvárnosti stanoveným edometrickou zkouškou. Zeminy jsou v přirozeném stavu podrobeny zkoušce Proctor standard pro zjištění optimální vlhkosti - w_{opt} pro docílení maximálního zhutnění. Edometrický modul – E_{oed} je určen i na zeminách upravených pomocí cementu v poměru 1,5 %, 3 % a 6 %. Záměrem práce je výpočtem, pomocí metody konečných prvků v aplikaci GEO5, srovnání hodnot sednutí v řezu násypového tělesa za použití upravené a neupravené zeminy. Hodnotí se největší míra sednutí v případě užití přirozené zeminy v porovnání se zeminou upravenou cementem v takovém poměru, ve kterém je vykazováno po vyhodnocení edometrické zkoušky nejlepších výsledků.

2. Metody úpravy zemin užívané ve výstavbě násypů dopravních komunikací

Neexistuje zemina, kterou by nebylo možno upravit z hlediska fyzikálně-mechanických vlastností. Zeminu nelze upravit pouze v případě, kdy není možné dosáhnout v potřebné míře kapacitních technologických možností upravujících strojů. Úprava zemin je prováděna v případech, kdy je tento přístup ekonomicky výhodnější než jiná opatření.

Způsob úpravy zemin je ovlivněn nejen fyzikálně-mechanickými parametry, ale i chemickým složením. Zeminy vhodné pro úpravu jsou ty, které spadají do druhé a třetí kategorie. Norma řadí zeminy do čtyř skupin:

- Nepoužitelné zeminy k jakémukoliv použití, nejdou upravit obvyklými technologiemi a možnost jejich úpravy a následného použití je zpravidla vyřazena.
- Nevhodné zeminy k bezprostřednímu použití, které je nutno vždy nejprve upravit.
- Podmíněně vhodné zeminy k přímému použití bez nutnosti úprav, mohou být použity i v neupraveném stavu, ale nutnost úprav je určována podle dalších vlastností.
- Vhodné zeminy k bezprostřednímu použití, které lze bez nutnosti úprav přímo použít.[1]

Tabulka 1: Vhodnost zemin do násypu a aktivní zóny násypu, vlastní zpracování (1)

	Nepoužitelné	Nevhodné	Podmíněně vhodné	Vhodné
Aktivní zóna	Zeminy obsahující organické látky v poměru větším než 6 % (rašelina, humus, ornice, bahna, CE, ME)	ML, MI, CL, CI MH, MC, CH, CV	S-F MG. CG. MS. CS. SM. SC. GM. GC. GP. SP	SW, GW G-F
Násyp		MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SM, SC, GM, GC, GP, SP ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F G-F S-F

Úprava zemin je proces, při kterém dochází k modifikaci upravované zeminy, aby pak zemina po ukončení procesu mohla plnit požadovaný účel. Proces úpravy zemin lze dělit na část zlepšovací a část stabilizační.

Cíl procesu zlepšování je modifikovat fyzikální vlastnosti jako je vlhkost, plasticita, namrzavost, odolnost proti vodě a eventuelně bobtnání po mísení zeminy s pojivem.

Zlepšování zemin provádíme za účelem splnění alespoň jedné z následujících vlastností:

- zpracování standardní technikou pro zemní práce,
- řádné zhutnění v pokládané vrstvě,
- varianta pojezdu vozidel a tvorba plochy pro nadložní vrstvy,
- příprava zeminy pro další vrstvu.

Cílem procesu stabilizace zemin je získání homogenní směsi zeminy a pojiva, případně zeminy pojiva a vody. Tento materiál postupně mění své vlastnosti, především svoji stabilitu v ohledu působení vody a mrazu.

Stabilizace zemin si klade za cíl vyhovět alespoň jedné ze zmíněných schopností:

- vzdorovat zatížením ve vertikálním, horizontálním a šikmém směru,
- vzdorovat zatížení dynamickému,
- odolávat styku s vodou,
- vzdorovat mrazu.

Mezi procesem zlepšení a procesem stabilizace zeminy hraje hlavní roli čas. Při procesu stabilizace zemin jsou účinky ovlivňovány v dlouhodobém časovém horizontu. Při zlepšování zemin hraje časový faktor krátkodobou roli a účinky se dostaví obvykle během 24-72 hodin. Záměrem tedy není docílit trvale změněných vlastností. Jedná se například o vysušení zemin s vyšší vlhkostí, neutralizace zemin s organickými složkami, neutralizace kyselých zemin, redukování plasticity jílovitých zemin apod.[2]

2.1. Návrh násypu dopravních komunikací

Násypové těleso společně s odvodněnou, upravenou nebo vyztuženou zeminou, která je v interakci s násypem, musí poskytovat schopnost přenášení zatížení, která vznikají jejich funkcí případně působením okolí.

Násypový materiál je volen na základě jeho dostatečné pevnosti, trvanlivosti, tuhosti a propustnosti po zhutnění. Tyto požadavky jsou hodnoceny na základě vlivů, kterým má být násypové těleso vystaveno. Jeho vhodnost na základě materiálových vlastností většinou splňují přirozeně zrnité materiály a dále například důlní odpady, elektrárenský popílek atd. V dalších případech mohou být použity i materiály typu lehkého kameniva nebo jemnozrnných materiálů, které však vyžadují zvláštní úpravu.

Jestliže místní materiál není pro násypové těleso vhodný, je možné zvolit postup pro úpravy vlhkosti, smísení materiálu s cementem, vápnem nebo dalším materiálem. Nevhodné zeminy pro použití v násypu jsou zeminy namrzavé, rozpustné, obsahující organické látky. Za přítomnosti chemických látek je nutné přijmout další opatření.[3]

2.2. Úpravy zemin užívané pro stavbu násypů dopravních staveb

Jestliže je násypové těleso budováno z upravené zeminy, může upravenou zeminu obsahovat jak celé těleso, tak také jen jeho část. Současně může být násyp budován jako vrstevnaté těleso v kombinaci upravené a neupravené zeminy. Každá z vrstev musí splňovat vlastnosti dle aktuální normy.

Násypové těleso tvořeno upravenou zeminou je budováno po jednotlivých vrstvách. K úpravě materiálu může docházet mimo násyp a následně je dovážena již hotová směs, která je následně rozprostřena a hutněna nebo je na násyp rozprostřena neupravená zemina, na kterou je nadávkováno pojivo nebo směs a následně dochází ke smísení a hutnění. Takto upravená vrstva musí splňovat předepsané parametry, aby mohlo dojít k budování vrstvy další.[1]

Tabulka 2: Vhodnost metody úpravy pro daný typ zeminy (4)

pojivo/příměs	Štěrkovité zeminy						Písčité zeminy						Jemnozrnné zeminy							
													F1	MG	F3	MS	F5	ML MI	F7	MH MV
	G3	G-F	G4	GM	G5	GC	S3	S-F	S4	SM	S5	SC	F2	CG	F4	CS	F6	CL CI	F8	CH CV
cement	•		•		•		•						•		•					
vápno					•					•		•	•		•		•		•	•
vápno + cement			•		•				•	•		•	•		•		•		•	•
popílek	•				•								•		•		•		•	•
struska	•						•		•		•									
chemický stab.													•		•		•		•	•
odprašky	•						•		•		•									
zeminy	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	•

2.3. Úprava zemin v aktivní zóně

Aktivní zónou se rozumí podloží vozovky, jedná se tedy o horní, z pravidla 0,5 m mocnou vrstvu v násypovém tělese. Na tuto vrstvu působí zatížení a klima. Tato vrstva je navrhována na základě přísnějších požadavků oproti zbylým částem násypových těles. [5]

Kvůli přísnějším požadavkům se doporučuje mísení aktivní úrovně ve dvou vrstvách o mocnosti 0,3 m při úpravě zemin pojivy. V případě nevyhovující zeminy je nutné dopravit materiál vhodný pro toto použití, který splňuje nutné požadavky. [1]

2.3.1. Mechanická stabilizace

Mechanická stabilizace slouží ke zlepšení mechanických vlastností dané zeminy. Upravená zemina disponuje lepší zpracovatelností, sníženou stlačitelností a zvýšenou smykovou pevností, která je zvyšována například metodou úpravy za užití textilních vláken.

Metodou mechanické úpravy se dosáhne lepší zpracovatelnosti a redukci stlačitelnosti. Mechanická úprava ve většině případů spočívá v úpravě křivky zrnitosti. K dosažení lepší křivky se používají příměsi vhodné zeminy nebo jiný materiál jako struska nebo popílek. [1]

Tabulka 3: Mechanická stabilizace zemin, vlastní zpracování (6)

Jíl	Prach	Písek	Štěrk
Výměna zemin			
Překonsolidace			
		Vibrační zhutňování	
	Dynamická konsolidace		
		Zhutňování odstřelem	
Vápenné piloty			Cementová injektáž
		Injektáž stabilními suspenzemi a chemickými směsmi	
Proudová injektáž			
Vertikální drény			
	Elektroosmóza		
	Zmrazování		
	Vypalování		
Vyztužení zeminy			

2.3.1.1. Vlákná při úpravě zemin

V případě této metody se jedná o mechanickou stabilizaci zemin za užití vláken. Tato vlákna mohou být z různého materiálu, typu a délky. Z pravidla se při úpravě zemin používají vlákna syntetická nebo vlákna přírodního původu. Nejčastěji to jsou vlákna polypropylénová, polyesterová a polyvinylalkoholová. Užití textilních vláken je ve fázi ověřovací pro praktické nasazení. Délka užívaných vláken se pohybuje v intervalu 5 až 100 mm a mohou být buď složená nebo jednoduchá. Především tento aspekt ovlivňuje přetváření zeminy. U tuhých a složených vláken je deformace z velké části dočasná a je nutno využít mnohem větší množství hutnicí energie, než je tomu u zeminy upravené jednoduchými vlákny, kdy dochází k výraznějšímu trvalému přizpůsobení.

Jemnozrnné zeminy jsou za použití této metody úpravy odolnější vůči erozi. Úhel vnitřního tření se použitím vláken u jílových zemin se střední plasticitou zvyšuje, soudržnost klesá o více než polovinu. Při zvyšující se deformaci roste mobilizace vláken a dochází tak k nárůstu smykové pevnosti. To znamená, že při malých přetvořeních je přínos vláken malý. Společně s pevností v prostém tlaku se zvyšuje i míra osová deformace a propustnost se u takto upravené zeminy také zvyšuje. [2]

2.3.2. Úprava zemin pojivy

Nejčastěji používaná je úprava cementem, vápnem, popílkem, vysokopecní struskou a hydraulickými silničními pojivy, kdy jde především o směs cementu, vápna a další příměsi v různém poměru.

Po aplikaci pojiv dochází k okamžitým změnám v zemině. Dochází například ke snížení vlhkosti, zvýšení únosnosti, zlepšení procesu hutnění atd. [1]

2.3.2.1. Vápno

Metoda stabilizace zemin vápnem má po procesu úpravy dvě základní fáze. Jedná se o fázi krátkodobých a dlouhodobých účinků.

Mezi krátkodobé účinky po aplikaci vápna do zeminy můžeme řadit hydrataci samotného vápna, odpařování vody a smísení zeminy se suchým materiálem. Tyto aspekty mohou snížit vlhkost o 1 až maximálně 5 % na 1 % vápna ve směsi. Na 1 % vápna také dochází k redukování indexu plasticity I_p o 1,5 až 2,5 %, navýšení optimální vlhkosti w_{opt} přibližně o 1 %, současně dochází ke zploštění křivky ze zkoušky Proctor standard a tím pádem k redukcí maximální objemové hmotnosti o 21 až 33 kg/m³. Vliv úpravy na zkoušku CBR připadá v CBR_{opt} i CBR_{sat} podobný, dochází k zvýšení až o 6,2 % CBR.

Dlouhodobé účinky se dostávají pomalu, jelikož se v upravené zemině tvoří nový druh minerálu, který na sebe váže interní částice. Díky těmto účinkům dochází ke zvýšení pevnosti v prostém tlaku, zvětšení CBR indexu, zvýšení odolnosti proti mrazu a směs je po saturaci stabilnější. [7]

2.3.2.2. Cement

V případě zlepšování zemin cementem je stěžejní zpevnění strukturních vazeb v získané směsi zeminy a pojiva. Poměr cementu se volí z intervalu 3 až 15 % z hmotnosti suché zeminy. Základní dva typy získaných směsí můžeme rozdělit na zeminu zlepšenou cementem a cementovou zeminu. V prvním případě jde o zeminu zlepšenou cementem v menší míře, jsou tedy zlepšeny mechanicko-fyzikální vlastnosti. Druhý typ má spíše vlastnosti podobné betonové desce. Druh upravované zeminy je stěžejní pro volbu poměru cementu.

Jedná se o dost používanou metodu, protože cement je oproti vápnu levnější a dostupnější. Modul přetvárnosti $E_{def,2}$ má rychlý nárůst a časem taky rychle klesá. Tento typ úpravy je vhodný pro zlepšování podloží u dopravních komunikací a staveb. [7]

2.3.2.3. Popílek

Popílek je produkt vznikající při spalování rozmělněného uhlí v elektrárnách. Používá se křemičitý a vápenatý. [1]

Popílek je dovoleno používat jen v částech násypového tělesa, kde nezasahuje a ani nemůže zasahovat hladina podzemní vody. Při této úpravě musí být zabráněno vztlínání vody a musí být chráněno před erozí, mrazem a celkově proti působení povětrnostních podmínek. To znamená překrytí 0,8 až 1 m mocnou vrstvou. [8]

2.3.2.4. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska se může do násypového tělesa použít v případě, že neobsahuje CaO, který způsobuje bobtnání. U strusky je důležitá zrnitost, vyluhovatelnost a rozpadavost. V případě použití vysokopecní strusky je možné očekávat objemové změny. [8]

2.4. Zařízení a stroje pro úpravu zemin

Stroje a zařízení užívané v jednotlivých stavebních krocích:

- Dávkování pojiva probíhá samojízdnými dávkovači s přesně daným dávkováním, které je závislé na rychlosti pohybu stroje. Dávkovače jsou často umístěny na podvozku nákladního vozidla nebo méně častěji je umístění samostatného dávkovače vlečeného například za traktorem.
- Mísení zeminy s pojivem je prováděno pomocí zemní frézy. Hlavní částí stroje jsou frézovací nože, kterými jsou složky míseny a zemina je současně kypřena a rozdružena. Mocnost mísené vrstvy je volitelná, avšak maximálně 0,5 m.
- Proces hutnění je prováděn klasickými prostředky jako jsou těžké vibrační válce, válce s hladkým i ježkovým běhounem a zhutňovací desky.
- Úprava vlhkosti probíhá pomocí kropiček a další procesy za užití grejdrů, buldozerů atd.[1]

3. Kritéria hodnocení zemin pro konstrukci násypů dopravních komunikací

Jak již bylo výše zmíněno, zeminy jsou děleny na vhodné, podmíněně vhodné a nevhodné do násypu. Vhodnost zemin pro toto použití stanovují i další ukazatele jako číslo konzistence- I_c , mez tekutosti- w_L a maximální objemová hmotnost- ρ_{dmax} . V případě využívání zemin v násypových tělesech, které nesplňují daná kritéria, musí být nezbytně upraveny. Zeminy upravujeme za účelem redukce optimální vlhkosti, snížení namrzavosti, zvýšení pevnosti a také pro snazší zpracovatelnost.[8] [9]

Požadavky na podloží vozovky se určují v závislosti na jeho typu. Dělí se na PI, PII, PIII. Následně zatříděné podloží musí být řádně zhutněno. [10]

Tabulka 4: Požadavky na modul pružnosti a deformační modul vzhledem k typu podloží vozovky, vlastní zpracování (10)

Typ podloží	Návrhový modul pružnosti	Minimální deformační modul
PI	120 000 kPa	90 000 kPa
PII	80 000 kPa	60 000 kPa
PIII	50 000 kPa	45 000 kPa

3.1. Geotechnické kategorie

Během návrhu násypového tělesa se zohledňují geotechnické poměry na staveništi a na základě Eurokódu 7 se aplikují tři kategorie:

- První geotechnická kategorie zahrnuje násypová tělesa do výšky 3 metry. V první kategorii se neuvažuje kontakt tělesa s tekoucí povrchovou vodou a založení stavby není v kontaktu ani s vodou podpovrchovou. V podloží stavby spadající do první geotechnické kategorie nesmí být zeminy prosedavé a příliš stlačitelné, nesmí se zde nacházet materiály typu organických naplavenin, rašeliny, bahno. V této kategorii se

používají pouze neupravené a ani nikterak mísené zeminy. Násypové těleso není vytvořeno vrstvením zeminy a není vyztuženo. Původní terén nabývá sklonu do 10 %. Návrhy prováděné v první geotechnické kategorii mohou být stanoveny na základě zkušeností a geotechnického průzkumu.

- Druhá geotechnická kategorie zahrnuje násypová tělesa vyšší než 3 metry a také ta jejichž výška sice nedosahuje tří metrů, ale kvůli nesplnění alespoň jednoho z kritérií jsou vyřazeny z předchozí kategorie. V případě, že je stavbou zemního tělesa změněna a ohrožena stabilita okolního území nebo může stavba ovlivnit přilehlé stavby nepříměřenými deformačními účinky.

V případě návrhu násypového zemního tělesa se v této kategorii zhotovuje geotechnický průzkum s běžnými terénními i laboratorními zkouškami.

- Do třetí geotechnické kategorie spadají stavby nebo jejich části, které kvůli nesplnění podmínek nelze zahrnout do předchozích dvou kategorií. Obvyklými důvody jsou vysoká, velmi členitá zemní tělesa, budována na sesuvných územích. Jsou zde zahrnuta i násypová tělesa z netradičních materiálů.

V případě návrhu se v této kategorii kromě běžných terénních a laboratorních zkoušek v rámci geotechnického průzkumu aplikují experimentální modely a zkoušky a probíhá dlouhodobý monitoring.[9]

3.2. Mezní stavy

3.2.1. Mezní stav porušení

Tento mezní stav je specifikován v Eurokódu 7-1, který jej řadí do pěti kategorií. Pro návrh násypového tělesa je stěžejní kategorie GEO, která je jedna z nejčastěji se vyskytujících. Jejím obsahem je porušení a přílišná deformace v prostředí horninovém a zemním. Stěžejní je pevnost zeminy či horniny ve srovnání s odporem.

Výchozí je podmínka:

$$E_d \geq R_d$$

Kde E_d vyjadřuje návrhovou hodnotu účinků zatížení a R_d návrhovou hodnotu odporu k zatížení. [11]

3.2.2. Mezní stav použitelnosti

Návrh konstrukce násypu musí dokázat, že jeho deformace nevyvolá mezní stav použitelnosti a to v násypu, pozemních komunikacích, inženýrských sítích situovaných v blízkosti násypu nebo na něm. [3]

Jako podmínku ověření mezního stavu použitelnosti udává Eurokód 7:

$$E_d \leq C_d$$

Kde E_d vyjadřuje návrhovou hodnotu od účinků zatížení a C_d limitní návrhovou hodnotu pro účinky zatížení.

Mezní stav srovnává hodnoty skutečné deformace s deformací limitní, můžeme říci skutečné sedání konstrukce s limitním, maximálním přípustným sednutím. Mezní stav se aplikuje na charakteristické hodnoty, součinitelé se pro uváděný mezní stav tedy rovnají jedné.

Limitní hodnoty sedání nejsou nijak stanoveny a neobsahuje je ani jedna z možných norem. Maximální možnou deformaci si stanovuje sám projektant a doporučuje se mu vycházet ze záznamů v dostupných skriptech.[11]

3.2.2.1. Limitní hodnota deformace

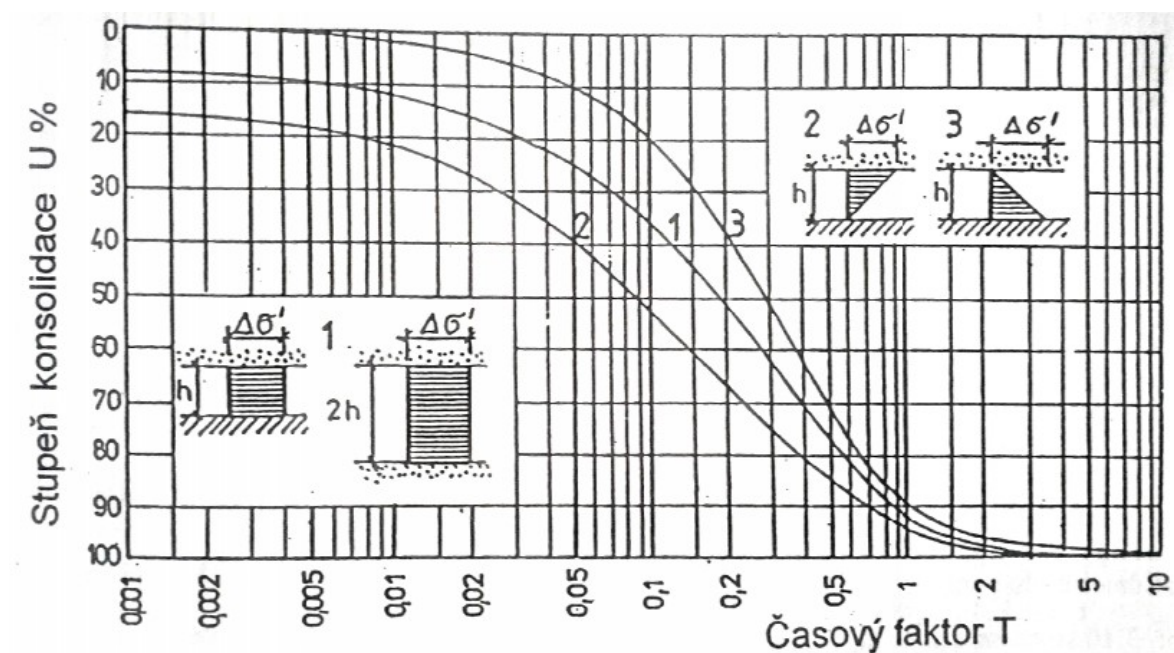
Stanovení maximálního možného sednutí a tím mezní hodnoty je prováděno na základě projevu poruch konstrukce, která je s násypovým tělesem v interakci. Za tuto konstrukci lze považovat vozovku, hranu mostního objektu, drenážní konstrukce atd. Právě mezi rozhraními tuhého objektu a objektu s pravděpodobným sedáním vznikají znatelné změny a rozdíl hodnot Δs je největší.

Je nutné brát v potaz i sedání po dokončení stavby. Hodnotí se tedy sedání v čase $t_0 + 3$ roky. V případě výstavby násypu z materiálu vhodného, dobře propustného a je podloženo, že velká část sedání proběhne už v průběhu výstavby, je možné klást podmínku $t_0 + 3$ rovnu nule. V případě, že násyp tvoří materiály méně vhodné s horšími konsolidačními schopnosti, je nutné sedání samotného násypového objektu zařadit do výpočtu. Časová hodnota t_0 se určuje odhadem, udává čas sedání v letech s tolerancí 0,25 roku. Hodnota t_0 je může lišit pro část násypu a část pod násypem.

Předpoklad průběhu sedání v čase vrstvy:

$$s_t = U_{(T)} \times S_c$$

U_T je stupeň konsolidace, určuje se graficky z obrázku. S_c je hodnota celkového sednutí. [9]



Obrázek 1: Grafické znázornění vztahu mezi časovým faktorem a stupněm konsolidace (9)

Časový faktor T se určí vztahem:

$$T = \frac{c_v \cdot t}{d^2}$$

Přičemž c_v součinitel konsolidace [m^2/s] určován na základě laboratorních zkoušek zemin v edometrickém přístroji, d mocnost konsolidované vrstvy, která je dána dráhou, kterou je vytlačována vrstvou zeminy.

Případně se může součinitel konsolidace určit vztahem:

$$c_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_n}$$

Přičemž k je součinitel filtrace [m/s], E_{oed} je edometrický modul přetvárnosti [kPa] a γ_n objemová tíha zeminy [kN/m^3]. [9]

3.3. Průkazní zkoušky zemin

Průkazní zkoušky jsou nezbytné pro provádění geotechnických konstrukcí, jejich přehled znázorňuje tabulka 5.

Tabulka 5: Průkazní zkoušky upravovaných zemin (1)

Vlastnost		Požadavek	Zkouška	Podmínky zkoušky
Zrnitost		kritéria použitelnosti podle tab. 1	ČSN CEN ISO/TS 17892-4	při mechanické úpravě
Číslo nestejnozrnnosti			Příloha A ČSN 73 6133	jen pro <i>S</i> nebo <i>G</i>
Max. objemová hmotnost (Proctor Standard)		deklarovaná hodnota	ČSN EN 13286-2	U zemin jemnozrnných nebo směsí zemin jemnozrnných a hrubozrnných kde lze zkoušku provést
Optimální vlhkost (dtto)				
CBR	aktivní zóna	<u>podloží</u> <u>CBR</u> P III 15 % P II 30 % P I 50 %	ČSN EN 13286-47	Platí i pro ztužující vrstvu vrstevnatého násypu. Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-10 až 14
IBI	aktivní zóna	deklarovaná hodnota		Pro účely kontrolních zkoušek. Zkouší se bezprostředně po zhotovení zkušebního úseku
	násyp a podloží násypu	min. 10 %		
Objemové změny (bobtnání)	aktivní zóna	max. 3%	ČSN EN 13286-47	lineární bobtnání při zkoušce CBR
Namrzavost	aktivní zóna	deklarovaná hodnota	zrnitostní kritérium (obr.A.1 ČSN 736133)	V případě pochyb nebo pro zeminy upravené pojivy. Zkouška podle ČSN 72 1191.

3.3.1. Proctor standard

Zhutnění je nezbytnou součástí výstavby nejen dopravních komunikací. Jedná se o proces, při kterém dochází ke snižování objemu pórů. Míra zhutnitelnosti je závislá na tvaru a pevnosti zrn, množství jemnozrnných částic a granulometrickém složení materiálu. Zkoušení pomocí metody Proctor standard je vhodné pouze pro materiály s obsahem zrn větších než 63 mm do 25 % celkového podílu.

Zkoušku Proctor standard využíváme za účelem stanovení vlhkosti w_{opt} , při které dochází k maximální zhutnitelnosti materiálu a získáváme maximální objemové hmotnosti ρ_{dmax} . Zkouška je prováděna v normovaném prstenci za dopadu normovaného pěchu z předepsané výšky a dle příslušného postupu pro dané typy normovaných pomůcek. [12]

Tabulka 6: Parametry zkušebních normovaných prstenců (12)

Proctorova forma	Průměr d_1 (mm)	Výška h_1 (mm)	Tloušťka stěny w (mm)	Tloušťka základní desky t (mm)
A	100,0±1,0	120,0±1,0	7,5±0,5	11,0±0,5
B	150,0±1,0	120,0±1,0	9,0±0,5	14,0±0,5
C	250,0±1,0	200,0±1,0	14,0±0,5	20,0±0,5

Tabulka 7: Parametry normovaného pěchu (12)

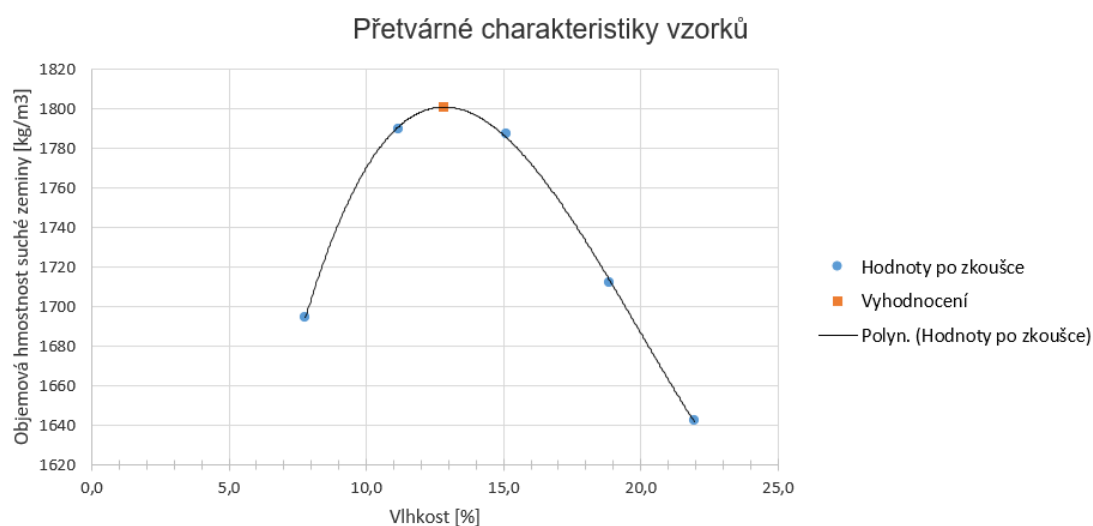
Pěch	Hmotnost pěchu m_R (kg)	Průměr základu d_2 (mm)	Výška dopadu h_2 (mm)
A	2,50±0,04	50,0±0,5	305±3
B	4,50±0,04	50,0±0,5	457±3
C	15,00±0,04	125,0±0,5	600±3

3.3.1.1. Postup zkoušky

Prvním krokem je příprava materiálu, která zahrnuje pět nebo více zkušebních vzorků s jejich minimální hmotností 2,5 kg. Každý z těchto vzorků obsahuje jiné množství vody, má tedy každý jinou vlhkost. Důležité pro správné provádění je, aby vlhkost byla ve vzorku zeminy rozložena rovnoměrně. Interval, ve kterém se vlhkost pohybuje, musí být volen tak, aby se na každé straně křivky nacházely alespoň dvě hodnoty.

Další částí zkoušky je umístění části vzorku do prstence v takovém množství, aby po zhutnění došlo k zaplnění alespoň jedné třetiny prstence. Postup se opakuje, avšak třetí vrstva nemá přesahovat více než 10 mm přes spodní okraj horní odnímatelné části prstence. Varianta zkoušky s prstencem A je hutnění 25 úderů dopadajícími po obvodu každé z vrstev. Varianta zkoušky s prstencem B je hutněna 56 pády pěchu na každou z vrstev. Následně je odnímatelná část formy odstraněna, přebytečná směs je kovovým pravítkem stažena a povrch je případně opraven a dokonale zarovnan. Zaznamená se hmotnost vzorku i s prstencem, následně je zemina vyjmuta a připravena ke stanovení vlhkosti. Postup se opakuje se zbylými vzorky pro získání minimálně pěti hodnot. [12]

Výstupem zkoušky je křivka, která vyjadřuje závislost vlhkosti zkoušeného materiálu na jeho maximální objemové hmotnosti.

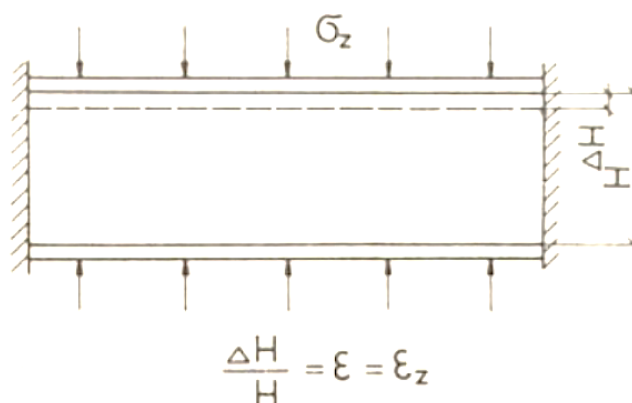


Graf 1: Závislost objemové hmotnosti suché zeminy na vlhkosti (13)

3.3.2. Edometrická zkouška

Zkouška v edometru funguje na principu jednoosé deformace. Deformaci ve vodorovném směru je zabráněno prstencem neboli konsolidačním kroužkem. Hlavní částí je edometrická hlavice, píst a filtrační destičky, které umožňují prostup vody. Osazený vzorek je v edometru chráněn kruhovým plexisklem, které zabraňuje přílišnému vysychání a stabilizuje potřebné prostředí.

Typicky je krokový průběh zkoušky, kdy dochází ke skokovitému přitěžování vzorku. Přiložené závaží prostřednictvím páky působí na píst a ten následně na vzorek zeminy. V momentě zatížení se deformace vzorku zeminy chová jako funkce času. Důležité je zvolit vhodný krok zatěžování. Jako obvyklá časová hodnota pro působení jednoho stupně namáhání je 24 hodin. Po uplynutí tohoto času se vzorek přetěžuje znovu, obvykle dvojnásobkem předchozího namáhání. Maximální zkoušené zatížení má být o něco vyšší než nejvyšší předpokládané napětí. Zatížení se zvyšuje až k dosažení stanovené meze. [14]



Obrázek 2: Zatěžovací princip jednoosé deformace (14)

Vodorovná deformace $\varepsilon_x = 0$ a současně $\sigma_{xef} = \sigma_{zef}$.

$$\sigma_{xef} = \sigma_{yef} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \sigma_{zef}$$

Závislost mezi vodorovným a svislým napětím je určena vztahem:

$$\sigma_{xef} = K_r \cdot \sigma_{zef}$$

Součinitel K_r se určí ze vztahu:

$$K_r = \frac{\gamma}{1 - \gamma}$$

Výraz pro normálně konsolidované zeminy:

$$E_{def} = E_{oed} \cdot \beta$$

β je dána vztahem:

$$E_{oed} = \frac{\sigma_{zef}}{\varepsilon_z}$$

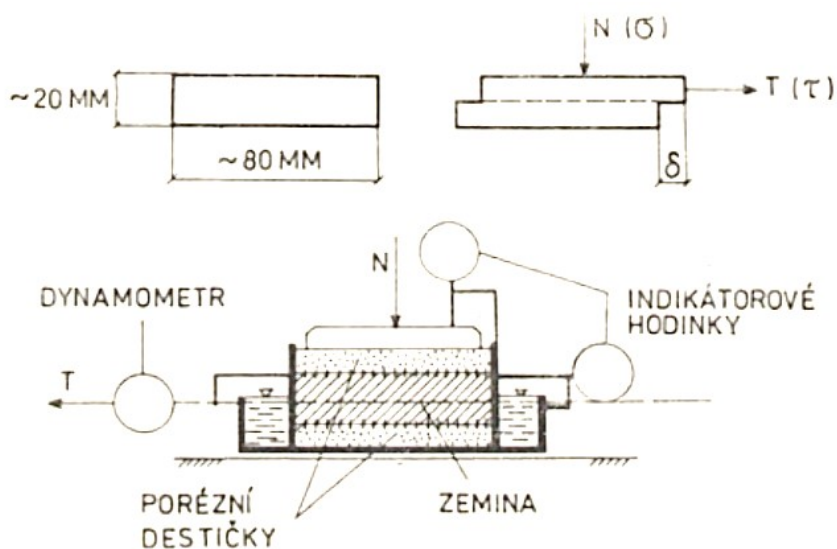
Kde E_{oed} je edometrický modul získán při zkoušení zeminy v edometru. Pomocí součinitele β lze určit vztah mezi modulem edometrickým a modulem přetvárnosti. [14]



Obrázek 3: Edometrický přístroj (foto autor)

3.3.3. Krabicová zkouška

U provedení krabicové zkoušky je nutná správná manipulace se vzorky. Zkoušejí se buď vzorky neporušené, odebrané v in situ nebo vzorky v laboratoři zhutněné. Zkoušené vzorky o jisté výšce mohou mít buď čtvercovou nebo kruhovou plochu. Cílem zkoušky je usmyknutí vzorku uprostřed jeho výšky. Vzorek je vložen mezi dvě čelisti a je opatřen propustnými destičkami. V místě styku čelistí je předurčena smyková plocha. Jedna z čelistí přístroje je pevná a druhá posuvná, v horní části krabice působí na vzorek normálová síla skrze píst. Během zkoušky se měří vzájemný posun krabic společně se smykovou silou a svislou deformací. [14]



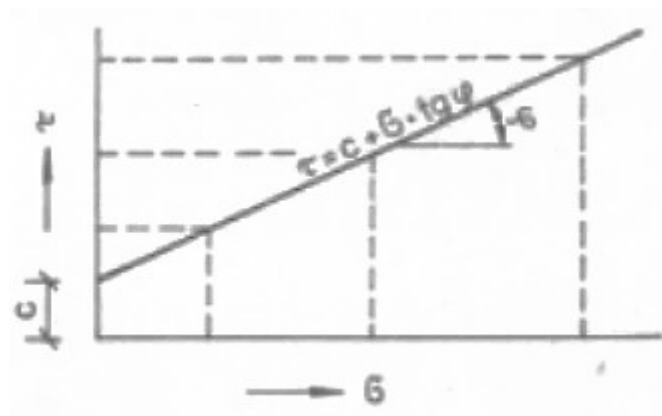
Obrázek 4: Náčrt krabicového přístroje (14)

Důležitým aspektem zkoušky je rychlost smykání, která musí být malá, aby se stihnul pórový tlak rozptýlit.

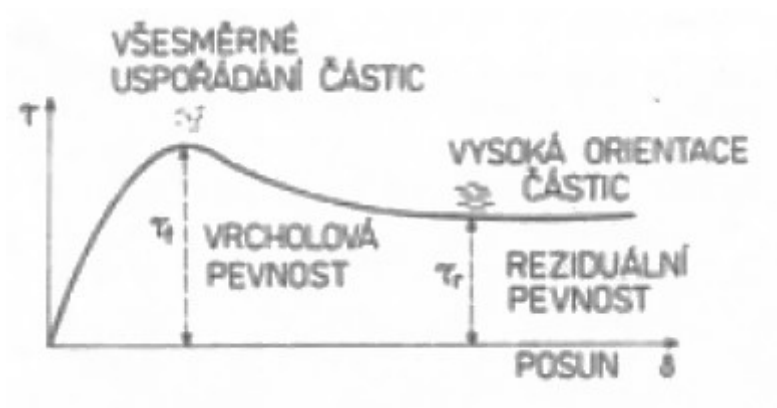
Rovnice smykové pevnosti:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Kde je τ tangenciální napětí na smykové ploše, σ je normálové napětí působící v kolmém směru na smykovou plochu, c je soudržnost zeminy a φ je uhel vnitřního tření zkoušené zeminy. [14]



Obrázek 5: Vztah mezi tangenciálním a normálovým napětím (14)



Obrázek 6: Vztah mezi tangenciálním a normálovým napětím na smykové ploše (14)



Obrázek 7: Smykový krabicový přístroj (foto autor)

3.4. Kontrolní zkoušky na zemní pláni pro upravované zeminy

Kontrolní zkoušky musí být prováděny příslušnou způsobilou laboratoří. Při práci se zeminou, která bude následně upravována je zapotřebí zkoumat, zda její vlastnosti a charakter je totožný se zeminou, na které byly prováděny průkazní zkoušky. Proto je zapotřebí provádět kontrolní zkoušky na čerstvě smíseném materiálu i po dokončení stavby viz tabulky níže. [1]

Tabulka 8: Kontrolní zkoušky pro čerstvě upravené zeminy (1)

Vlastnost		Požadavek	Četnost ^{1), 3)}
Minimální vlhkost ¹⁾		$W_{0,90}$	1 x na 10 000 m ³
IBI min.	aktivní zóna	min. deklarovaná hodnota	1 x na 10 000 m ³
	násyp	min. 10 %	1 x na 10 000 m ³
¹⁾ Podle ČSN EN 14 227-10, ČSN EN 14 227-11, ČSN EN 14 227-12, ČSN EN 14 227-13, ČSN EN 14227-14 ³⁾ Uvedené údaje tabulky platí pro homogenní poměry. Při změně materiálu se musí provést všechny zkoušky. Při změně konzistence se stanoví pouze vlhkost.			

Dále je nutno kontrolovat:

- dávkování pojiva, které může vykazovat například odchylky v objemové hmotnosti,
- hloubka promísení, která je měřena v kopané sondě za pomoci kontrastní látky fenolftalein,
- hrudkovitost zeminy nesmí přesáhnout 25 mm,
- zkoušky pojiva - může dojít například k hydrataci při manipulaci nebo skladování. [1]

Tabulka 9: Přehled kontrolních zkoušek upravovaných zemin (1)

Vlastnost / Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost ^a
Vlhkost	jemnozrnné zeminy	odchylky od w_{opt} -5% až +3%	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 x 1250 m ³ nebo 500 m ³
Míra zhutnění dle objemové hmotnosti (parametr D)	podloží násypu	92% PS	ČSN 72 1006	1 x 4000 m ³ nebo 1500 m ³ a při každé změně sypaniny u homogenní sypaniny nejméně 3 x denně
	násyp z jemnozrnných (F) nebo písčitých zemin (SW, SP, SF) nebo popílku	95% PS		
	aktivní zóna / zemní pláš	100% PS		1 x na 100 bm dopravního pásu, popř. 1x na 1000 m ² ostatních ploch
Minimální vlhkost	zeminy upravené	$w_{0,90}$	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 x 10000 m ³ nebo 1 x denně
CBR	ztužující vrstva vrstevnatého násypu	min. 15%	ČSN EN 13286-47	
IBI	aktivní zóna	min. deklarovaná hodnota		
	násyp	min. 10%		
	podloží násypu	min. 10%		

^a Jsou-li uvedena 2 kritéria četnosti zkoušek, musí být splněno kritérium přísnější

4. Příklad návrhu upravované zeminy

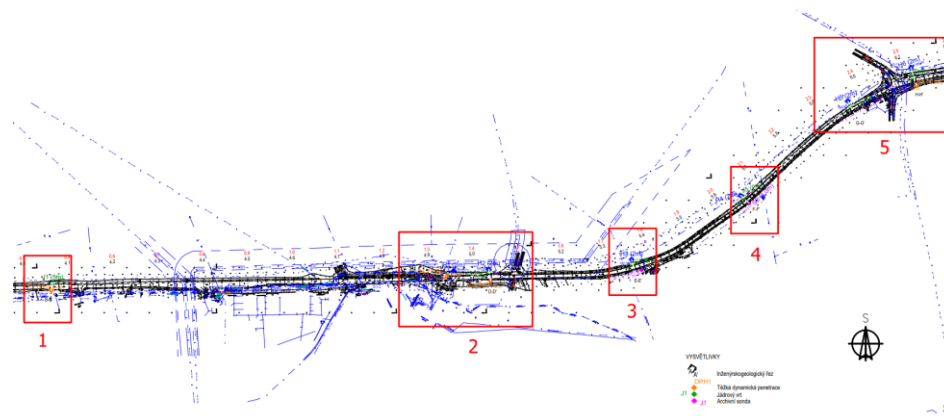
Práce vychází z reálné problematiky pozemní komunikace situované nedaleko Uherského Hradiště. Stavba bude realizovaná na silnici II/497. Tuto dopravní komunikaci je nutno společně s násypovým tělesem rekonstruovat. V geotechnickém, inženýrskogeologickém a hydrogeologickém průzkumu pro projekci této silnice bylo uvažováno s typem podloží PIII. [13]



Obrázek 8: Mapa s vyznačenou oblastí zkoumaného úseku silnice (15)

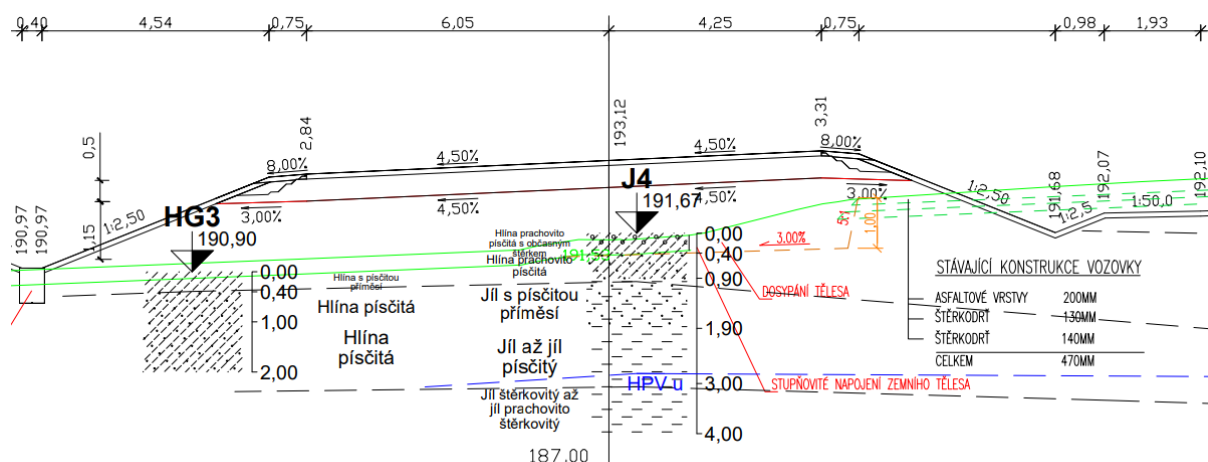
V místě proběhl geotechnický, inženýrsko-geologický a hydrogeologický průzkum. Z těchto průzkumů byla čerpána některá data, která byla mimo jiné použita i pro následné vyhodnocení programem GEO5 v této práci.

V rámci průzkumů byly vyhotoveny jádrové vrty, hydrogeologické vrty, dynamické penetrace a celá řada dalších laboratorních zkoušek. Průzkumné aktivity byly soustředěny do pěti charakteristických oblastí, kde byly dále řešeny jednotlivé řezy.



Obrázek 9: Situace zkoumaného úseku silnice (13)

Tato práce se dále soustředí na oblast označenou číslem tři v situačním výkresu. Stávající komunikace s násypem je v daném řezu nevyhovující a je nutno těleso násypu posunout a to tak, že bude stávající násyp mírně zasahovat do tělesa násypu nového viz obrázek 10.



Obrázek 10: Řez uvažovaným násypovým tělesem (13)

Pro návrh úpravy zeminy do násypu dopravní komunikace, který dosahuje maximální výšky 1,65 m, byla vybrána zemina F5 Cl. Jedná se o jíl s písčitou příměsí konzistence tuhé až pevné. Tato zemina je situována na místě a je po sejmutí kulturní vrstvy a ornice první využitelná do násypu a jeví se jako podmíněně vhodná pro použití.

Tabulka 10: Popis jádra vrtu v uvažovaném řezu, vlastní zpracování (13)

0,0 - 0,4 m HLÍNA prachovito-písčitá konzistence tuhá, kulturní vrstva	0	
	0,1	
	0,2	
	0,3	
	0,4	
0,4 - 0,9 m PODORNICE - HLÍNA prachovito-písčitá konzistence tuhá až pevná	0,5	
	0,6	
	0,7	
	0,8	
	0,9	
0,9 - 1,9 m JÍL s písčitou příměsí konzistence tuhá až pevná	1	
	1,1	
	1,2	
	1,3	
	1,4	
	1,5	
	1,6	
	1,7	
	1,8	
	1,9	
1,9 - 3,0 m JÍL až JÍL písčitý konzistence tuhá při hladině vody měkká až tuhá	2	
	2,1	
	2,2	
	2,3	
	2,4	
	2,5	
	2,6	
	2,7	
	2,8	
	2,9	
	3	
3,0 - 4,0 m JÍL štěrkovitý až JÍL písčito-štěrkovitý konzistence měkká, měkká/tuhá	3,1	
	3,2	
	3,3	
	3,4	
	3,5	
	3,6	
	3,7	
	3,8	
	3,9	
	4	
	4,1	
	4,2	
	4,3	
	4,4	
	4,5	
	4,6	
	4,7	
	4,8	
	4,9	
	5,0	

Jelikož je zemina podmíněně vhodná, je ji nutno před použitím upravit. Pro zvýšení únosnosti, byla zvolena úprava cementem. Tato metoda je vhodná pro násypy dopravních komunikací a dobře proveditelná za užití zemní frézy, která pojivo dávkuje a mísí se zeminou.

Zemina byla zkoušena metodou Proctor standard pro získání informací o vlhkosti a zhutnitelnosti. Následně na vzorcích v přirozeném stavu byla pro zjištění úhlu vnitřního tření a soudržnosti vykonána krabicová smyková zkouška. Taktéž proběhlo posouzení v edometrickém přístroji pro stanovení edometrického modulu, a to jak v přirozeném stavu, tak ve stavu po smísení zeminy s cementem CEM 42,5 R, který se vyznačuje rychlým nárůstem pevnosti a takto upravená zemina by měla dokazovat větší únosnost.

Pro úplný návrh konstrukce násypu je nutné doplnit i další zkoušky jako je CBR, IBN, objemová změna způsobená bobtnáním, namrzavost, zrnitost, číslo nestejnozrnatosti, Atterbergovy meze a posoudit stabilitu svahů násypového tělesa.

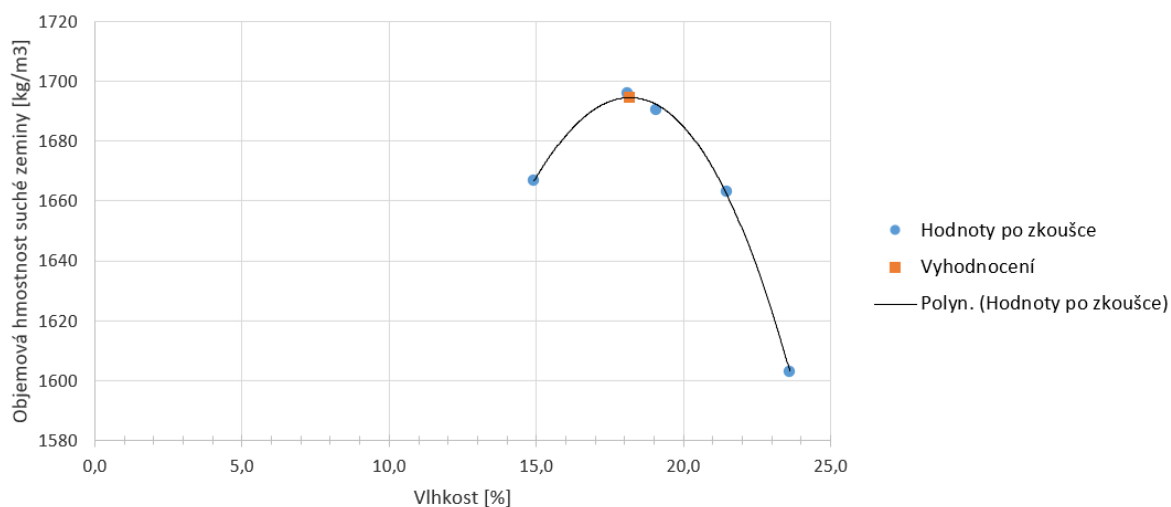
5. Stanovení parametrů upravované a neupravované zeminy

5.1. Proctor standard

Zemina byla zkoušena metodou Proctor standard pro získání informací ohledné optimální vlhkosti a maximální suché objemové hmotnosti. Zkouška probíhala na technologických vzorcích neupravené zeminy, u kterých byla řízena vlhkost. Zpravidla byl zkoušen vzorek s přirozenou vlhkostí a následně dva vzorky, které byly vysoušené v troubě po dobu 20-ti a 60-ti minut. Do dalších dvou vzorků byla přidána voda, tak aby jejich konzistence nebyla až příliš plastická a rozmístění na předpokládané ose vlhkosti bylo vhodné. Vzorky byly následně vzduchotěsně uzavřeny a odloženy na minimálně 24 hodin, aby se jejich vlhkost rovnoměrně rozložila v celém objemu zeminy.

Hodnoty vstupující do grafického řešení zeminy					
Vzorek	P1 přirozená w	P2	P3	P4	P5
w [%]	19,07	14,92	18,09	21,47	23,61
ρ [kg/m ³]	2012,54	1914,33	2002,93	2020,02	1981,56
ρ_d [kg/m ³]	1690,21	1666,60	1696,04	1662,94	1603,05

Obrázek 11: Data vstupující do zkoušky Proctor standard



Obrázek 12: Grafické vyhodnocení zkoušky Proctor standard pro neupravenou zeminu

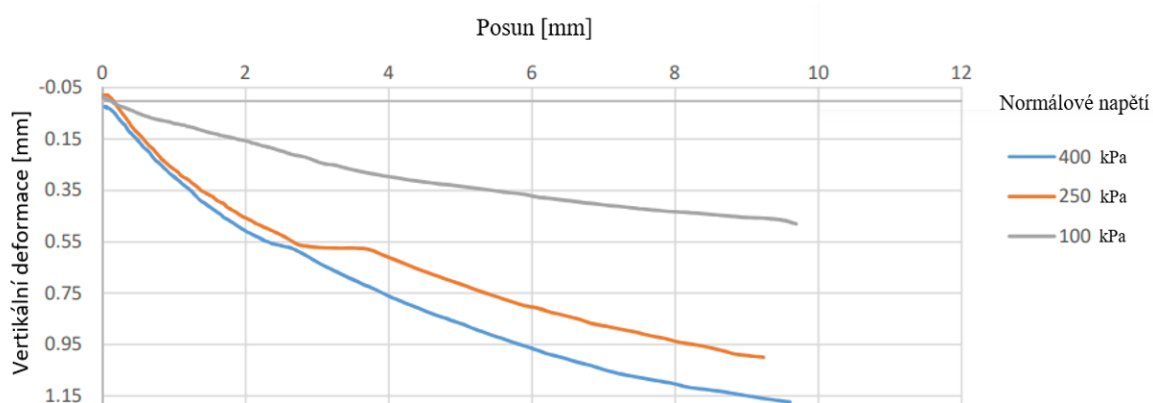
Po proložení zjištěných hodnot křivkou bylo z její rovnice, pomocí derivace určeno maximum, tedy maximální suchá objemová hmotnost- $\rho_{dmax} = 1\,695\text{ kg/m}^3$, které je možno dosáhnout při optimální vlhkosti- $w_{opt} = 19,2\%$.

5.2. Vyhodnocení krabicové zkoušky

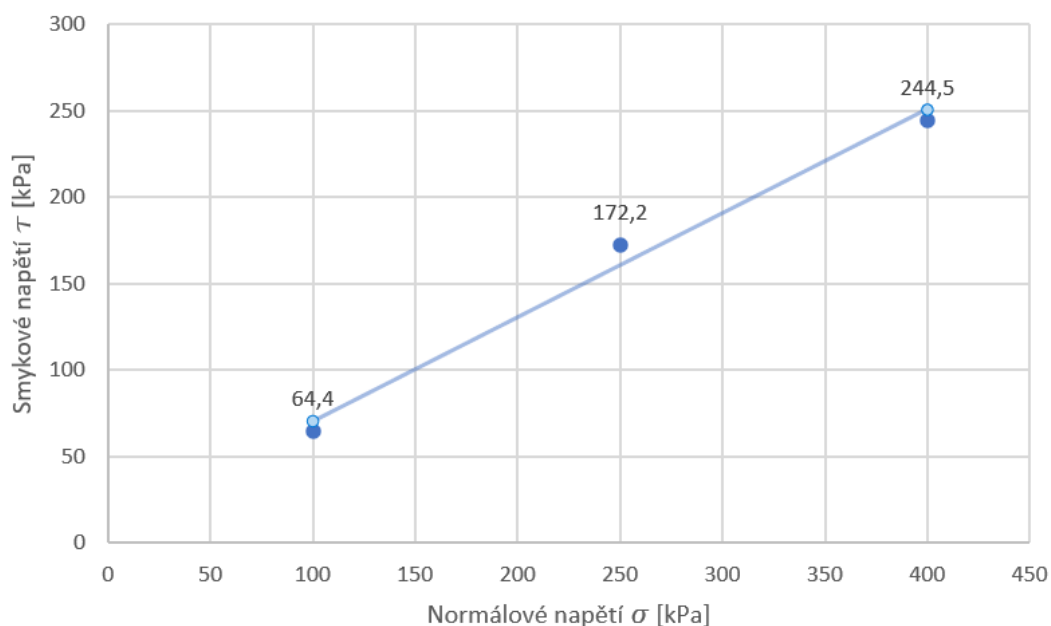
Krabicová zkouška proběhla na zemině v přirozeném stavu o přirozené vlhkosti. Na zeminu působilo svislé napětí σ o velikosti 100, 250 a 400 kPa, zemina byla smýkána rychlostí 0,02 mm/min.

Tabulka 11: Data smykové krabicové zkoušky neupravené zeminy, vlastní zpracování (13)

σ [kPa]	F [kg]	A [m ²]	τ_{max} [kPa]	τ_{min} [kPa]	Parametry vrcholové smykové pevnosti	
400	31	0,007854	244,5	244,5	Úhel vnitřního tření φ_{ef} [°]	30,6
250	20	0,007854	172,2	172,2	Soudržnost c_{ef} [kPa]	13,3
100	9	0,007854	67,0	64,4	Parametry reziduální smykové pevnosti	
					Úhel vnitřního tření φ_{ef} [°]	31,0
					Soudržnost c_{ef} [kPa]	10,2



Graf 2: Závislost vertikální deformace na pohybu neupravené zeminy při daných normálových napětích (13)



Graf 3: Závislost smykového napětí na napětí normálovém, vlastní zpracování (13)

5.3. Edometrická zkouška

Edometrická zkouška byla provedena na vzorcích zeminy v přirozeném uložení a na vzorcích zeminy mísených s cementem v poměru 1,5 %, 3 % a 6 %. Příprava vzorků s cementem spočívala v důkladném rozmělnění zeminy a následným přidáním cementu CEM 42,5 R v příslušném hmotnostním poměru. Směs byla dále zhutněna metodou Proctor standard a vytlačena do zkoušecího prstence. V případě upravených zemin vzorek zrál po dobu sedmi dnů. Takto připravený vzorek byl přitěžován 200, 400, 500 kPa s časovým krokem 24 hodin.



Obrázek 13: Příprava edometrické zkoušky (foto autor)

Edometrický modul byl stanoven ze vztahu:

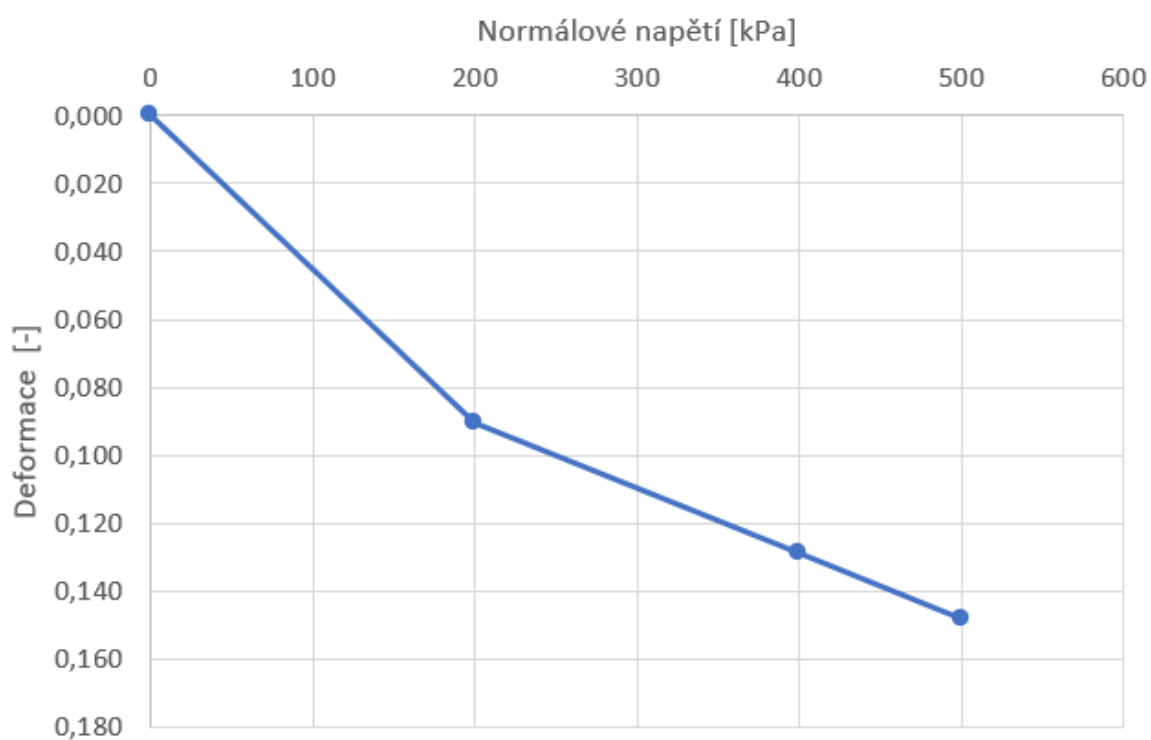
$$E_{oed} = \frac{\sigma_{400} - \sigma_{200}}{\varepsilon_{400} - \varepsilon_{200}}$$

Kde E_{oed} je výstupem edometrický modul v kPa, σ_{400} je normálové napětí o velikosti 400 kPa, σ_{200} je normálové napětí o velikosti 200 kPa a ε_{400} a ε_{200} je deformace vyvolaná normálovým napětím se stejným označením.

5.4. Vyhodnocení zkoušky pro neupravenou zeminu

Tabulka 12: Data získaná edometrickou zkouškou neupravené zeminy bez příměsí

Normálové napětí [kPa]	0	200	400	500
Čtení [mm]	4,290	2,482	1,715	1,324
Stlačení [mm]	0,000	1,808	2,575	2,966
Deformace [-]	0,0000	0,0904	0,1288	0,1483
E_{oed} [kPa]	5215,090			

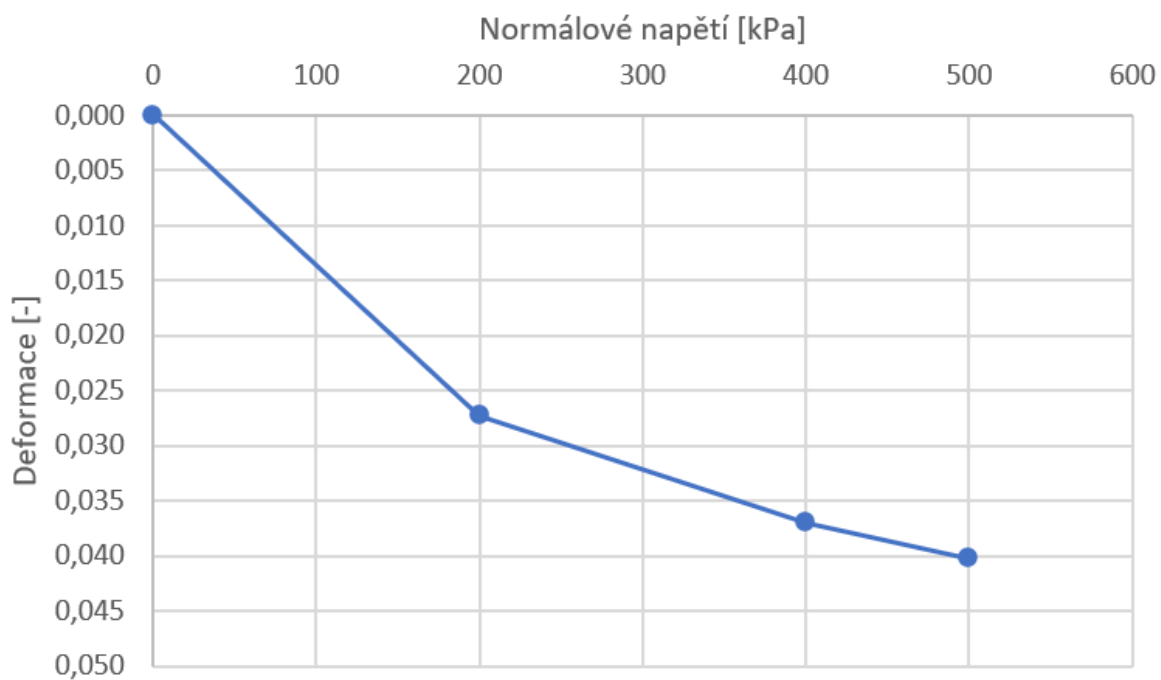


Graf 4: Vyhodnocení edometrické zkoušky neupravené zeminy

5.5. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 1,5 %

Tabulka 13: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 1,5 % cementu

Normálové napětí [kPa]	0	200	400	500
Čtení [mm]	6,090	5,545	5,350	5,285
Stlačení [mm]	0,000	0,545	0,740	0,805
Deformace [-]	0,0000	0,02725	0,0370	0,0403
E_{oed} [kPa]	20512,821			

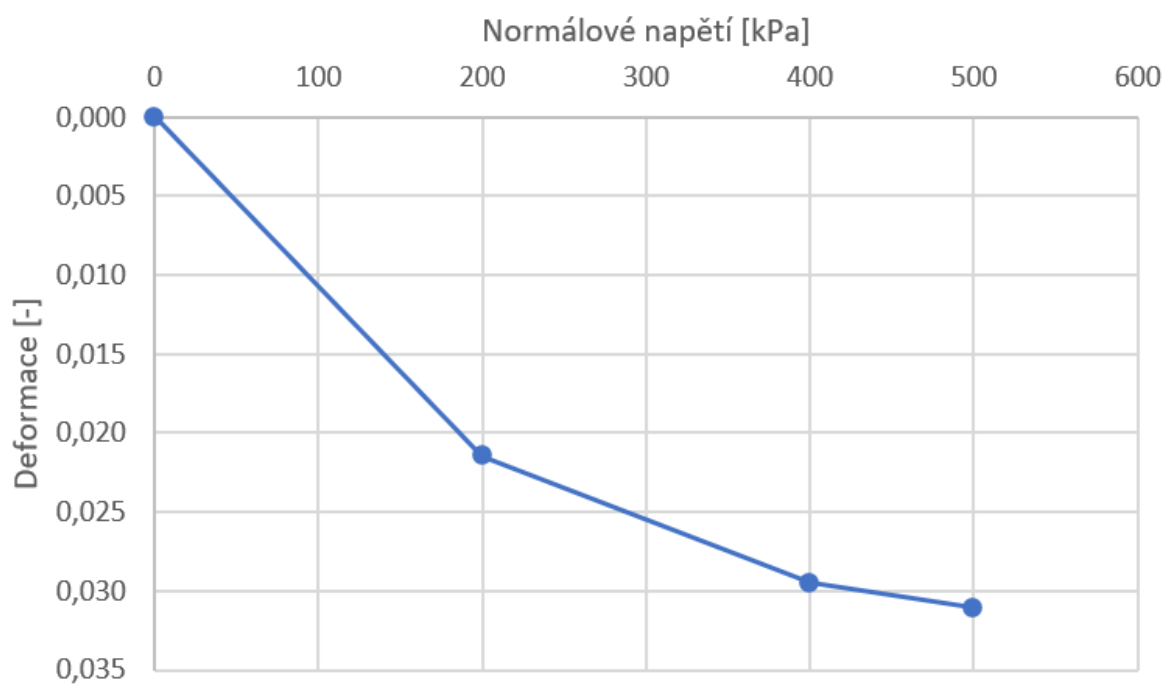


Graf 5: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 1,5 % cementu

5.6. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 3 %

Tabulka 14: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 3 % cementu

Normálové napětí [kPa]	0	200	400	500
Čtení [mm]	5,000	4,561	4,410	4,359
Stlačení [mm]	0,000	0,429	0,590	0,621
Deformace [-]	0,0000	0,0215	0,0295	0,0311
E_{oed} [kPa]	24844,721			

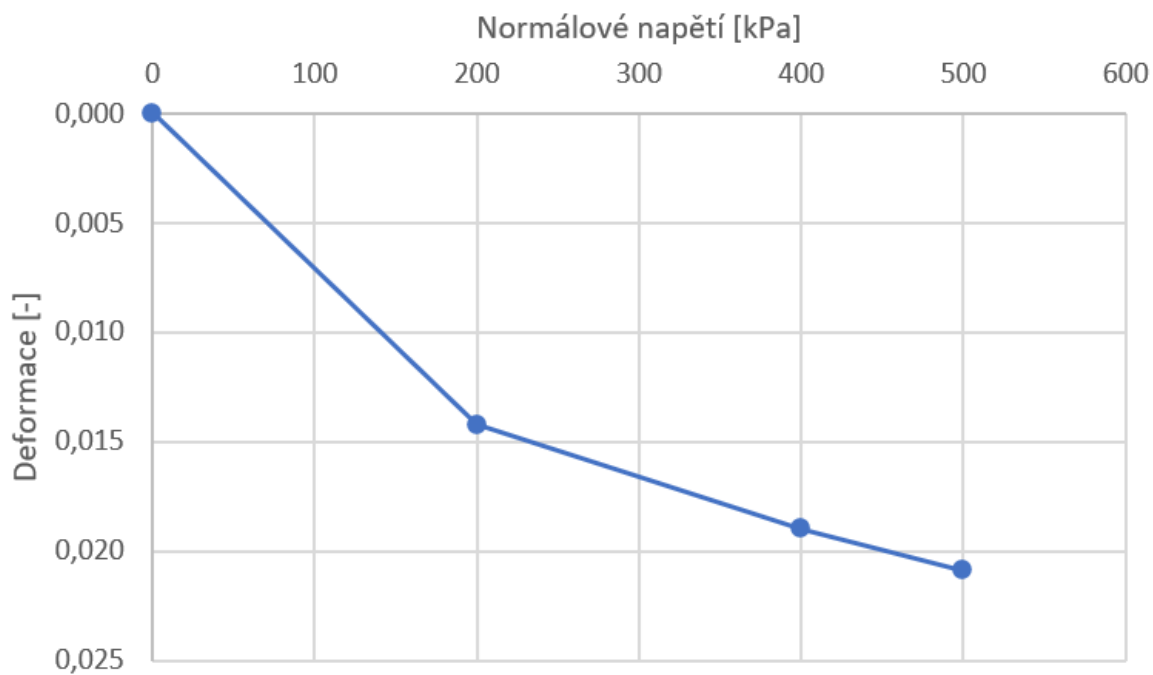


Graf 6: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 3 % cementu

5.7. Vyhodnocení zkoušky pro zeminu s příměsí cementu 6 %

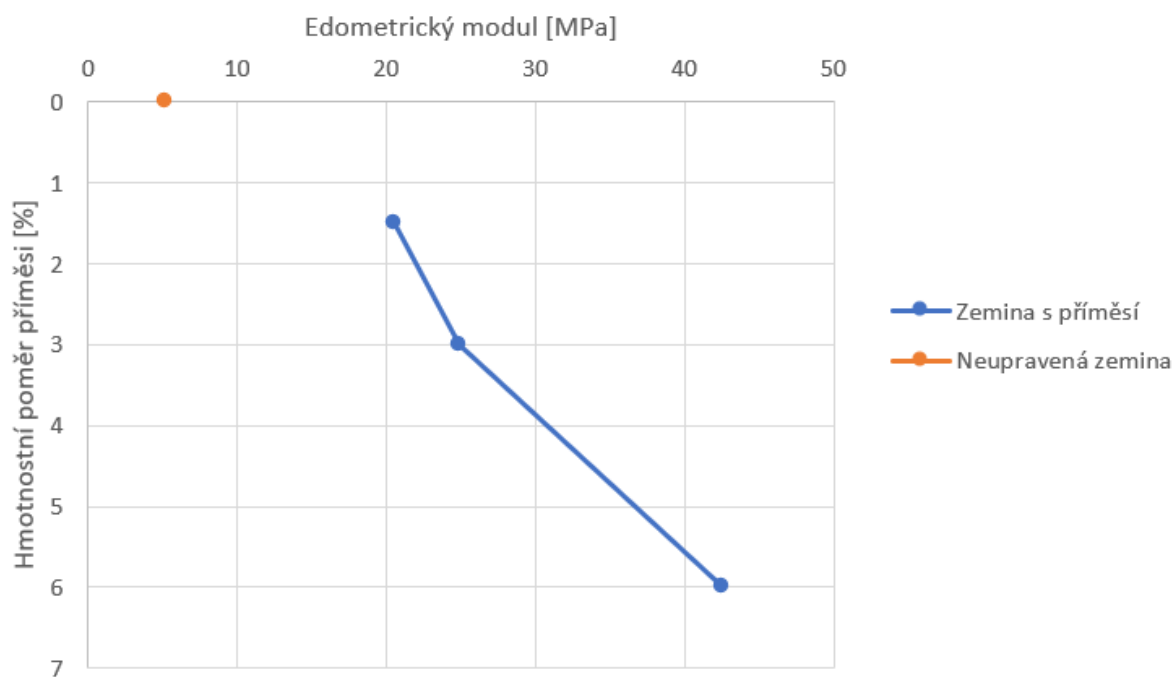
Tabulka 15: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 6 % cementu

Normálové napětí [kPa]	0	200	400	500
Čtení [mm]	7,000	6,715	6,620	6,582
Stlačení [mm]	0,000	0,285	0,380	0,418
Deformace [-]	0,0000	0,0143	0,0190	0,0209
E_{oed} [kPa]	42105,088			



Graf 7: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 6 % cementu

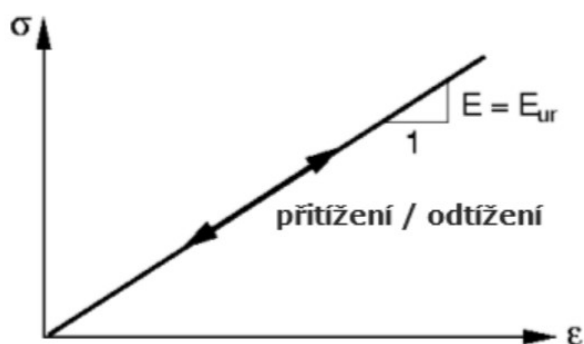
Při zkoušce jednoosé stlačitelnosti bylo dosaženo nejlepších výsledků v případě zeminy upravené 6% příměsí cementu CEM 42,5 R. U neupravené zeminy E_{oed} dosahoval 5 215 kPa, zemina upravená 1,5% cementu měla edometrický modul 20 513 kPa, zemina s příměsí cementu 3 % dosáhla 24 845 kPa a nejlépe hodnocená směs zeminy s 6% cementu docílila modulu 42 105 kPa.



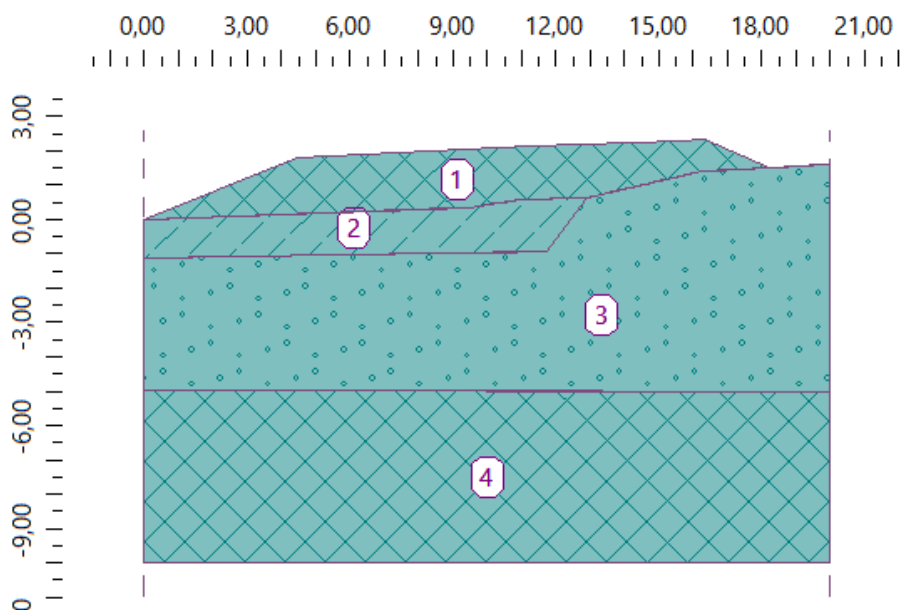
Graf 8: Závislost edometrického modulu na hmotnostním poměru příměsí použitého pojiva

6. Návrh násypu z upravené a neupravené zeminy a jejich srovnání

Pro výpočtový model byla použita aplikace GEO5 a program MKP. Pro výpočet sedání byl zvolen elastický model. Jedná se o lineární model, který funguje na základě vztahů mezi deformací a napětím dle Hookova zákona. Uvažujeme tedy v daném intervalu lineární závislost mezi osovým namáháním a vzniklou deformací. [16]



Obrázek 14: Lineární vztah mezi přetížením a deformací (16)



Obrázek 15: Grafické přiřazení zemin v řezu násypového tělesa

V případě zeminy označené číslem 1 byly u jednotlivých výpočtových modelů měněny parametry v závislosti na typu užitého materiálu. Parametry ostatních zemin zůstaly stejné a byly voleny dle provedených zkoušek, případně zkušeností projektanta.

Přehled užitých parametrů pro jednotlivé zeminy:

- Zemina označena číslem 2:

○ Hlína prachovito písčítá

Objemová tíha:	γ	=	17,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,40
Modul pružnosti:	E	=	3 000 kPa
Objemová tíha saturované zeminy:	γ_{sat}	=	17,50 kN/m ³
Koeficient filtrace:	k	=	4,167·10 ⁻⁶ m/s

- Zemina označena číslem 3:

○ Písek prachovitý

Objemová tíha:	γ	=	20,10 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,30
Modul pružnosti:	E	=	9 000 kPa
Objemová tíha saturované zeminy:	γ_{sat}	=	20,50 kN/m ³
Koeficient filtrace:	k	=	6,956·10 ⁻⁷ m/s

- Zemina označena číslem 4:

○ Jíl písčítý

Objemová tíha:	γ	=	19,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,38
Modul pružnosti:	E	=	7 000 kPa
Objemová tíha saturované zeminy:	γ_{sat}	=	19,50 kN/m ³
Koeficient filtrace:	k	=	1,157·10 ⁻⁸ m/s

[13]

6.1. Fáze vytvořené v modelu

1. Fáze

V tomto kroku bylo deaktivováno samotné násypové těleso. Hladina podzemní vody byla aplikována v hloubce 3,74 m od nulové souřadnice. V 1. fázi proběhly výpočty napjatosti.

2. Fáze

V této části výpočtu bylo násypové těleso stále v neaktivním módu. Proběhla konsolidace v časovém intervalu 10 dnů.

3. Fáze

Ve fázi tři bylo aktivováno násypové těleso, které působí svou hmotností nejen na vrstvy pod ním, ale i na sebe samé. Proběhlo sednutí v časovém rámci 40-ti dnů.

4. Fáze

Násypové těleso zůstalo aktivní a působí na něj současně přetížení od dopravy o velikosti 20 kN/m². Sedání bylo modelováno v době 290 dnů.

6.2. Aplikace neupravené zeminy

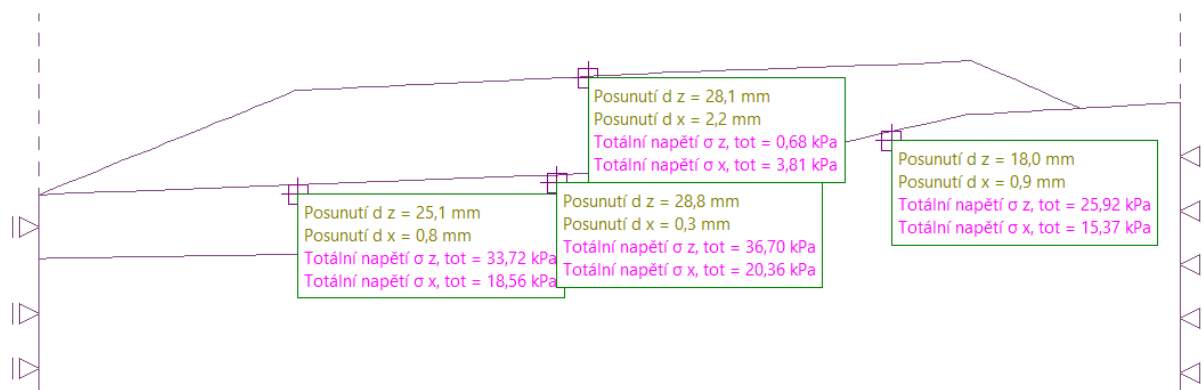
K první modelaci situace byla do výpočtu aplikována zemina neupravená.

Byly použity tyto parametry:

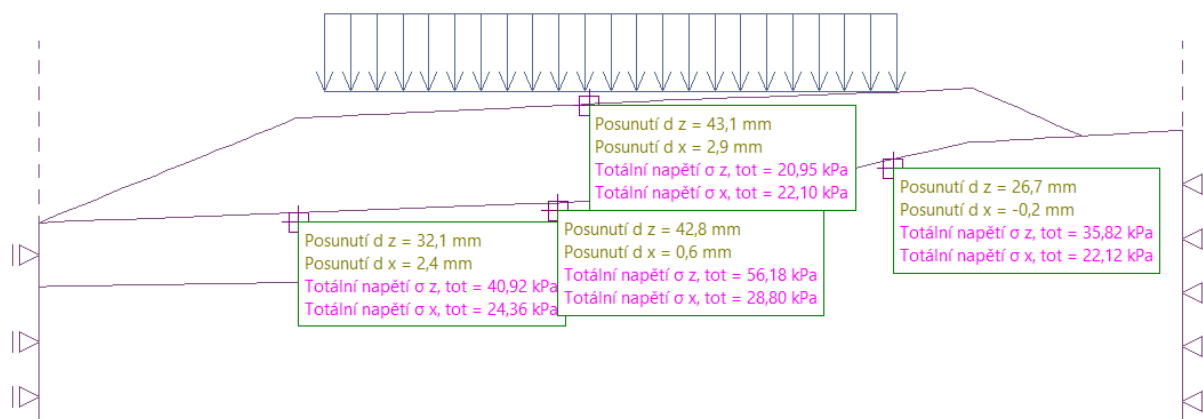
- Zemina označena číslem 1:

○ Jíl s písčitou příměsí

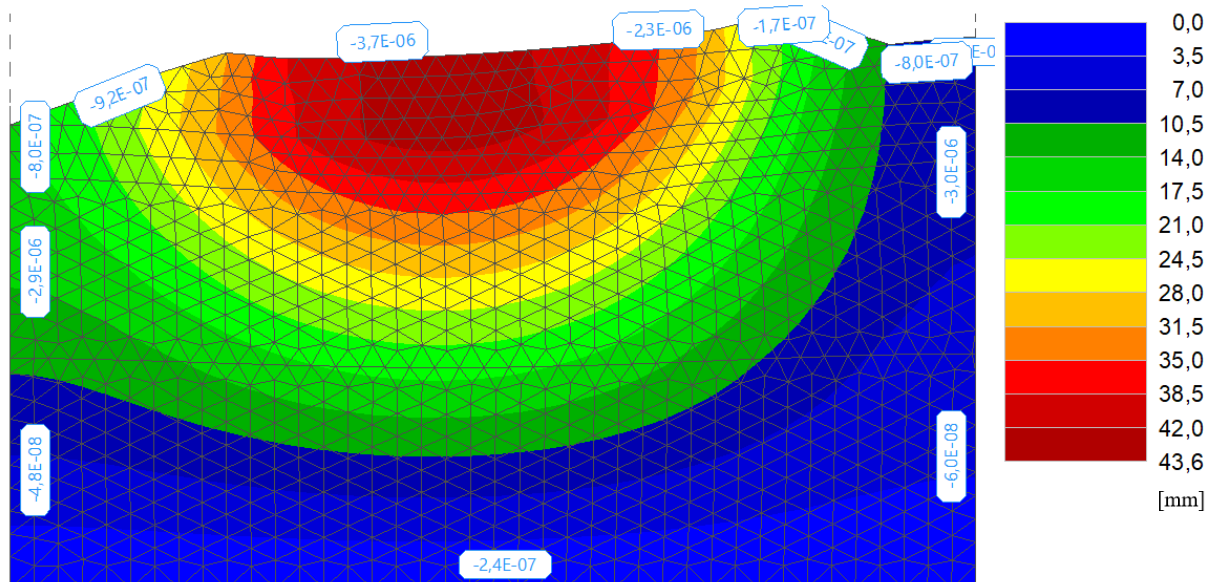
Objemová tíha:	γ	=	20,12 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,47
Modul pružnosti:	E	=	5 210 kPa
Objemová tíha saturované zeminy:	γ_{sat}	=	21,90 kN/m ³
Koeficient filtrace:	k	=	3,472·10 ⁻¹³ m/s



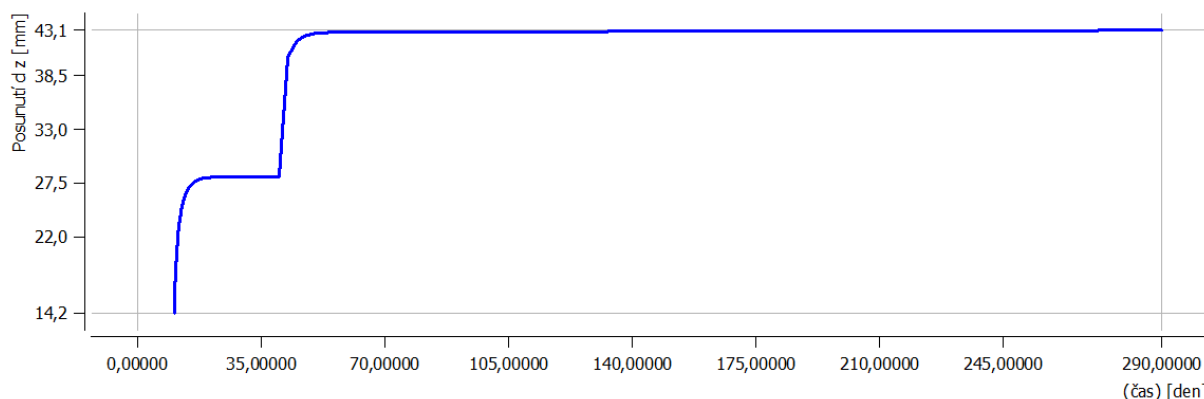
Obrázek 16: Posun v monitorech neupravené zeminy na konci třetí fáze



Obrázek 17: Posun v monitorech neupravené zeminy na konci čtvrté fáze po zatížení dopravou



Obrázek 18: Grafické znázornění výsledného sednutí neupravené zeminy



Graf 9: Průběh hodnot sedání neupravené zeminy v závislosti na čase

Výpočtový model zaznamenal největší sednutí ve středové části násypového tělesa v hodnotě 43,6 mm. Sedání se v násypu projevuje v intervalu 10,5 až 43,6 mm. V rozmezí spodní hranice intervalu se hodnoty pohybují v patách násypu a na jeho svazích, kde dochází k menšímu působení mocnosti tělesa samotného a přetížení dopravou nemá takové účinky.

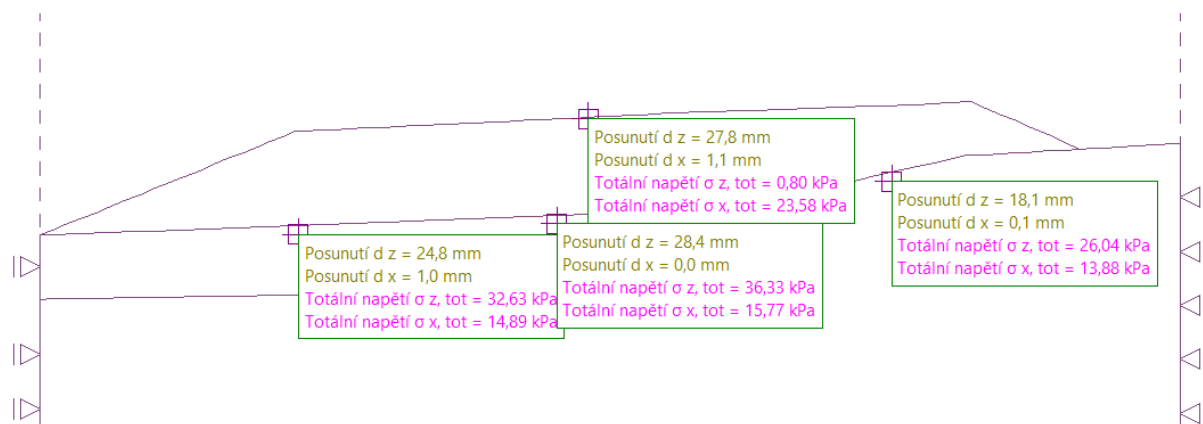
6.3. Aplikace upravené zeminy s příměsí cementu v poměru 6 %

Ve výpočtu byla použita zemina do násypu, s přiřazovacím číslem 1, upravená zemina s 6% hmotnostním poměrem cementu.

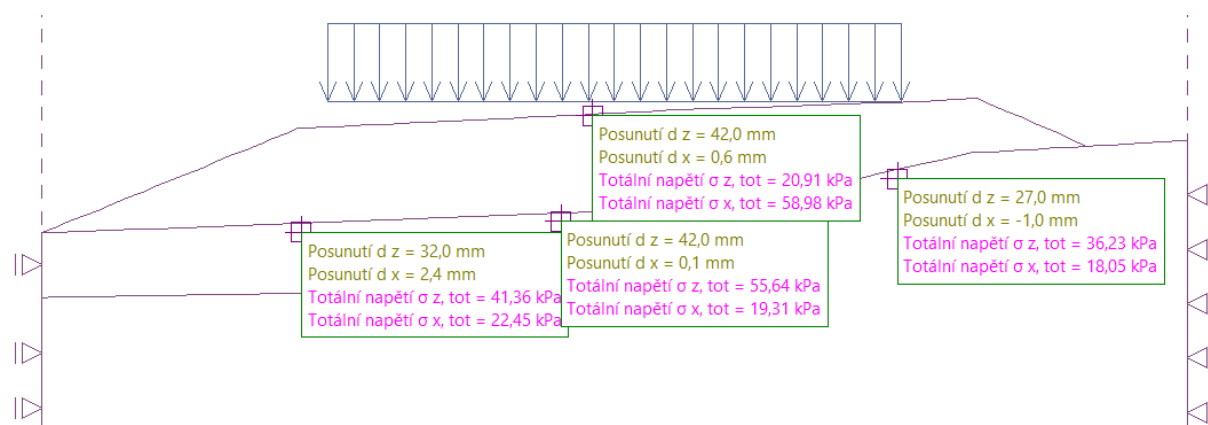
Byly použity tyto parametry:

- Zemina označena číslem 1:
 - Jíl s písčitou příměsí 6 % cementu

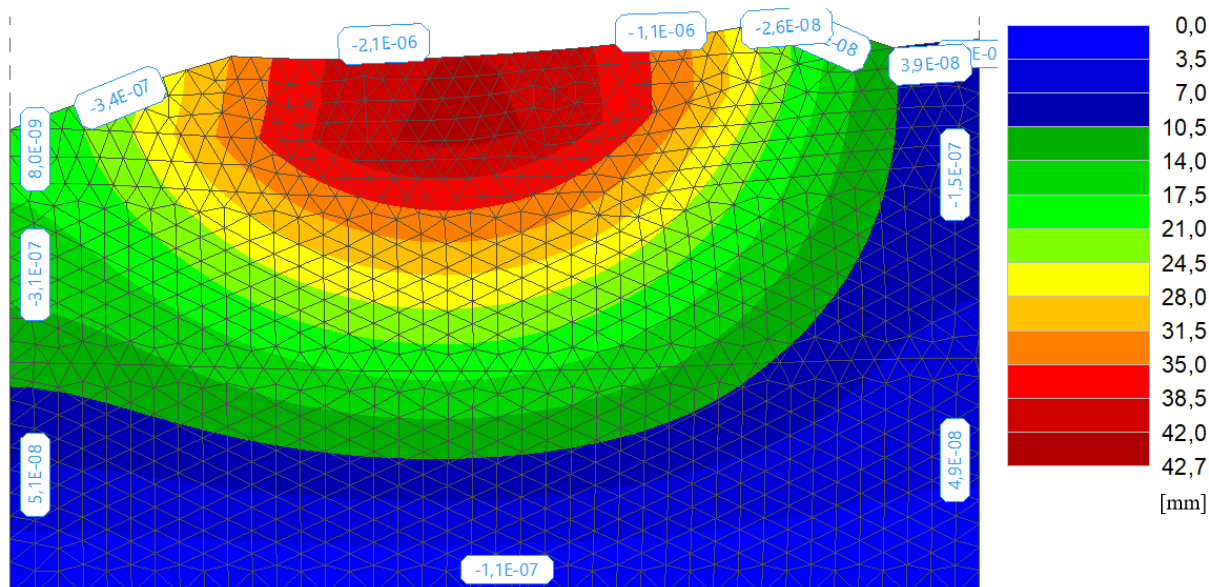
Objemová tíha:	γ	=	20,12 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,47
Modul pružnosti:	E	=	42 100 kPa
Objemová tíha saturované zeminy:	γ_{sat}	=	21,90 kN/m ³
Koeficient filtrace:	k	=	$3,472 \cdot 10^{-13}$ m/s



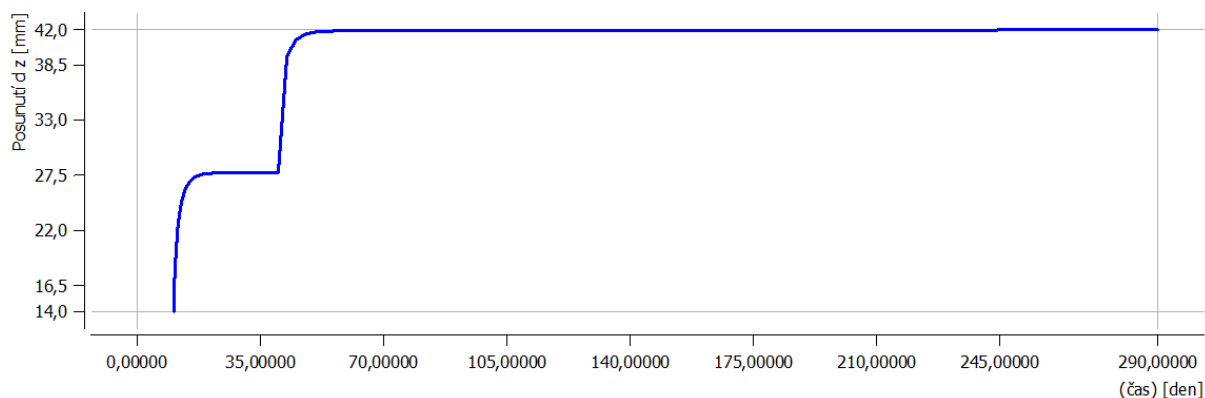
Obrázek 19: Posun v monitorech upravené zeminy na konci třetí fáze



Obrázek 20: Posun v monitorech upravené zeminy na konci čtvrté fáze po zatížení dopravou



Obrázek 21: Grafické znázornění výsledného sednutí upravené zeminy



Graf 10: Průběh hodnot sedání upravené zeminy v závislosti na čase

Dle výpočtového modelu je největší konečné sednutí v konstrukci po přitížení dopravou 42,7 mm. Interval, ve kterém se hodnota sednutí konstrukce pohybuje je 10,5 až 42,7 mm v závislosti na velikosti zatížení mocností samotným násypovým tělesem a následnou dopravou. K maximálnímu vertikálnímu posunutí dochází ve středové oblasti násypu a k nejmenšímu orientovanému posunutí ve spodní hranici intervalu v oblasti pat násypového tělesa.

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnutí úpravy zeminy pro vznik vhodné směsi do násypu dopravní komunikace o výšce 1,65 metru. V počáteční fázi se práce zabývá teoretickými poznatky souvisejícími s prací se zeminou, blízkou problematikou, celkovou úpravou zemin jak ve smyslu širšího pojetí, kdy byly popsány některé z jednotlivých procesů úpravy zeminy, tak následně v užším pojetí, kdy se jednalo o úpravu zeminy cementem, kterou se zabývá také teoretická část.

Pro zkoumání byla vybrána zemina s označením F5 CI, jíl s písčitou příměsí konzistence tuhé až pevné. Zemina byla podrobena zkoušce Proctor standard, pro zjištění optimální vlhkosti- w_{opt} , která dosáhla hodnoty 19,2 %. Maximálního zhutnění tedy lze dosáhnout při objemové hmotnosti- $\rho_{dmax} = 1695 \text{ kg/m}^3$. Následně byla provedena zkouška v krabicovém smykovém přístroji. V tomto případě byly zjištěny reziduální a vrcholové parametry. Úhel vnitřního tření ϕ činil v případě vrcholových hodnot $30,6^\circ$ a v případě hodnot reziduálních $31,0^\circ$. Soudržnost- c vrcholová dosáhla hodnoty 13,3 a soudržnost reziduální 10,2.

Hlavní podstatou práce byla problematika nevyhovujících vlastností zvolené zeminy, kterou tak nelze použít do násypového tělesa bez užití některé z úprav. Pro zvýšení únosnosti byla tedy zkoumána úprava cementem CEM 42,5 R v poměrech 1,5 %, 3 % a 6 % ku suché hmotnosti zeminy. Na neupravené i cementem upravených zeminách byla prováděna zkouška v edometrickém přístroji. Zatěžování probíhalo v režimu 200 kPa, 400 kPa a 500 kPa při časovém kroku 24 hodin. Edometrický modul- E_{oed} byl hlavním ukazatelem. V případě přirozené zeminy E_{oed} dosáhl 5 215 kPa. Výraznějšímu zlepšení došlo při aplikaci cementu. Při užití 1,5 % cementu E_{oed} dosáhl 20 513 kPa, při užití cementu v poměru 3 % byl E_{oed} navýšen na 24 845 kPa. Smísením zeminy s cementem v poměru 6 % bylo dosaženo E_{oed} 42 106 kPa.

Dále byl vytvořen model v aplikaci GEO5, kdy bylo metodou konečných prvků vyhodnocováno sedání. Fáze výpočtu byly rozděleny do čtyř budovacích částí. Byly porovnány výsledky dvou případů. V prvním z nich byly použity parametry zeminy neupravené, největší konečné sednutí v nejovlivněnějších místech bylo stanoveno na 43,6 mm, z toho většina proběhla před poslední fází a ke zbylému sedání s hodnotou pohybující se kolem 15 mm došlo po zatížení 20 kN/m stavební technikou nebo případně následnou dopravou. V druhém případě byly použity data ze zkoušky provedené na zemině s příměsí cementu 6 %. U takto upravené

zeminy došlo k nárůstu E_{oed} o 36 891 kPa. Celkové sedání bylo v nejkritičtějších místech stanoveno na 42,7 mm z toho většina proběhla do třetí fáze. V poslední fázi došlo k velmi podobnému sednutí jako v prvním případě.

Pro použití v reálné praxi by bylo vhodné upravit podloží samotného násypového tělesa, které přenáší kromě zatížení od dopravy a vozovky také zatížení od násypu samotného. U zemin užitých v zemní konstrukci, která má sloužit dopravní stavbě, je nutné brát v potaz podmínky, které materiál musí splňovat. Vztah mezi E_{oed} a E_{def} je závislý na koeficientu β , který je u zvažované zeminy roven 0,40. Vyplývá tedy z toho, že podmínka pro zeminu užitou v podloží vozovky v násypovém tělese $E_{def} \geq 45\,000$ kPa není splněna, protože deformační modul vychází u upravené zeminy pouhých 16 842 kPa. V aktivní zóně násypového tělesa zemina nemůže být použita ani za předpokladu zlepšení, jelikož je vedena jako nepoužitelná pro tuto oblasti zemní konstrukce.

Pro skutečnou realizaci stavby je zkoumaná zemina v násypovém tělese nepoužitelná, bylo by ji vhodné užít do podloží násypu a případně zkoumat její chování s vyšším poměrem cementu. Tato úprava by redukovala míru interakce oproti aktuálně tam situovaným zeminám, které nejsou zcela vyhovující. Materiál samotného násypového tělesa musí splňovat podmínku $E_{def} \geq 45\,000$ kPa, bylo by tedy vhodné využít blízkého zdroje například v oblasti nedaleké řeky, kde by mohl být vytvořen zemník pro získání použitelné sypaniny. Zemina by následně mohla být vyměněna nebo její křivka zrnitosti upravena vhodnými frakcemi. Zároveň musí být u uvažovaných materiálů vykonány veškeré nezbytné zkoušky.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Grafické znázornění vztahu mezi časovým faktorem a stupněm konsolidace (9).	23
Obrázek 2: Zatěžovací princip jednoosé deformace (14).....	27
Obrázek 3: Edometrický přístroj (foto autor).....	28
Obrázek 4: Náskres krabicového přístroje (14)	29
Obrázek 5: Vztah mezi tangenciálním a normálovým napětím (14)	30
Obrázek 6: Vztah mezi tangenciálním a normálovým napětím na smykové ploše (14).....	30
Obrázek 7: Smykový krabicový přístroj (foto autor)	30
Obrázek 8: Mapa s vyznačenou oblastí zkoumaného úseku silnice (15).....	33
Obrázek 9: Situace zkoumaného úseku silnice (13).....	34
Obrázek 10: Řez uvažovaným násypovým tělesem (13)	34
Obrázek 11: Data vstupující do zkoušky Proctor standard	37
Obrázek 12: Grafické vyhodnocení zkoušky Proctor standard pro neupravenou zeminu	37
Obrázek 13: Příprava edometrické zkoušky (foto autor)	39
Obrázek 14: Lineární vztah mezi přitížením a deformací (16)	46
Obrázek 15: Grafické přiřazení zemin v řezu násypového tělesa	46
Obrázek 16: Posun v monitorech neupravené zeminy na konci třetí fáze	49
Obrázek 17: Posun v monitorech neupravené zeminy na konci čtvrté fáze po zatížení dopravou	49
Obrázek 18: Grafické znázornění výsledného sednutí neupravené zeminy	49
Obrázek 19: Posun v monitorech upravené zeminy na konci třetí fáze	51
Obrázek 20: Posun v monitorech upravené zeminy na konci čtvrté fáze po zatížení dopravou	51
Obrázek 21: Grafické znázornění výsledného sednutí upravené zeminy.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vhodnost zemin do násypu a aktivní zóny násypu, vlastní zpracování (1)	12
Tabulka 2: Vhodnost metody úpravy pro daný typ zeminy (4)	15
Tabulka 3: Mechanická stabilizace zemin, vlastní zpracování (6).....	16
Tabulka 4: Požadavky na modul pružnosti a deformační modul vzhledem k typu podloží vozvky, vlastní zpracování (10)	20
Tabulka 5: Průkazní zkoušky upravovaných zemin (1)	24
Tabulka 6: Parametry zkušebních normovaných prstenců (12)	25
Tabulka 7: Parametry normovaného pěchu (12)	25
Tabulka 8: Kontrolní zkoušky pro čerstvě upravené zeminy (1)	31
Tabulka 9: Přehled kontrolních zkoušek upravovaných zemin (1).....	32
Tabulka 10: Popis jádra vrtu v uvažovaném řezu, vlastní zpracování (13)	35
Tabulka 11: Data smykové krabicové zkoušky neupravené zeminy, vlastní zpracování (13).	38
Tabulka 12: Data získaná edometrickou zkouškou neupravené zeminy bez příměsí	41
Tabulka 13: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 1,5 % cementu.....	42
Tabulka 14: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 3 % cementu.....	43
Tabulka 15: Data získaná edometrickou zkouškou zeminy s příměsí 6 % cementu.....	44

Seznam grafů

Graf 1: Závislost objemové hmotnosti suché zeminy na vlhkosti (13).....	26
Graf 2: Závislost vertikální deformace na pohybu neupravené zeminy při daných normálových napětích (13).....	38
Graf 3: Závislost smykového napětí na napětí normálovém, vlastní zpracování (13).....	39
Graf 4: Vyhodnocení edometrické zkoušky neupravené zeminy.....	41
Graf 5: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 1,5 % cementu.....	42
Graf 6: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 3 % cementu.....	43
Graf 7: Vyhodnocení edometrické zkoušky zeminy s příměsí 6 % cementu.....	44
Graf 8: Závislost edometrického modulu na hmotnostním poměru příměsí použitého pojiva	45
Graf 9: Průběh hodnot sedání neupravené zeminy v závislosti na čase	50
Graf 10: Průběh hodnot sedání upravené zeminy v závislosti na čase.....	52

Seznam literatury

- [1] TP 94. *Úprava zemin: Technické podmínky*. Praha: Ministerstvo dopravy odbor pozemních komunikací, 2013.
- [2] *Úprava zemin. Česká silniční společnost* [online]. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: http://www.silnicnispolecnost.cz/images/P%C5%99%C3%ADlohy/Uprava_zemin_-_uk%C3%A1zka_r.pdf
- [3] *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [4] LUDVÍK, Jan. *Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [5] RADIMSKÝ, Michal. *PROJEKTOVÁNÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ MODUL 2: KUBATURY, HMOTNICE, ROZVOZNÉ VZDÁLENOSTI*. Brno, 2007. Studijní materiál. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] *Mechanika hornin a zemin: Podklady k přednáškám* [online]. Ostrava: Robert Kočínek, [2014] [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-12.pdf>
- [7] PAVELKA, Ondřej. *Zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zemin pomocí hydraulických pojiv*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [8] ČSN 73 6133, *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] KARLÍN, Petr. *Monitoring sedání násypů dopravních staveb*. Praha, 2013. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [10] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací: Technické podmínky*. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2004.
- [11] VANÍČEK, Ivan, Tereza ČIHÁKOVÁ, Daniel JIRÁSKO, Jan KOS, Jan SALÁK a Martin VANÍČEK. *Projektování základových a zemních konstrukcí: Ivan Vaníček,*

Tereza Čiháková, Daniel Jirásko, Jan Kos, Jan Salák, Martin Vaníček. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05913-5.

[12] GRMELA, Jan. *Posouzení stanovení zhutnitelnosti jemnozrnné zeminy*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

[13] POUL, Ivan. *Geotechnický, inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum pro projekci silnice II/497: Projekce iGEO s.r.o.* Brno, 2020.

[14] ŠIMEK, Jiří. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00428-4.

[15] *Mapy.cz* [online]. Praha: Seznam.cz, 2020 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=17.5520821&y=49.0897007&z=13&l=0>

[16] Uživatelská příručka [online]. 1. Praha: Fine, spol. s.r.o., 2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/manualy/>

Seznam příloh

Příloha 1	Protokol výpočtového modelu sedání násypu z neupravené zeminy
Příloha 2	Protokol výpočtového modelu sedání násypu ze zeminy upravené cementem v poměru 6 %

Přílohy